



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUHO-PETTERI STORBERG
MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN ARVONTUOTTO

Diplomityö

Tarkastajat: Associate Professor
Minna Lanz ja Tekn. lis. Jorma
Vihinen Tarkastajat ja aihe hy-
väksytty Teknisten tieteiden tie-
dekuntaneuvoston kokouksessa
31. toukokuuta 2017

TIIVISTELMÄ

JUHO-PETTERI STORBERG: Materiaalia lisäävän valmistuksen arvontuotto

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 71 sivua, 3 liitesivua

Elokuu 2017

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tuotantotekniikka

Tarkastajat: Associate Professor Minna Lanz ja Tekn. lis. Jorma Vihinen

Avainsanat: Materiaalia lisäävä valmistus, Suorakerrostus, Maturiteetti, Tuotanto, Suunnittelu

Tutkimuksessa selvitetään materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämismahdollisuuksia vaativiin koneistuksiin erikoistuneen konepajan tuotannossa. Työssä kerrotaan eri materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmistä, menetelmillä saavutettavista hyödyistä ja niiden käyttöönottoon liittyvistä haasteista. Työssä avataan myös suunnittelun merkitystä materiaalia lisäävässä valmistuksessa. Metallien materiaalia lisäävistä valmistusmenetelmistä syvennyttään enemmän suorakerrostukseen, erilaisiin suorakerrostusmenetelmiin ja – prosesseihin.

Tutkimuksen päätavoitteet ovat suorakerrostuksen hyödyntämismahdollisuuksien selvittäminen yrityksen tuotannossa, suorakerrostusteknologian maturiteettitason ja kehityksen selvittäminen. Teoriaosuudessa kerrotaan kirjallisuustutkimuksen perusteella materiaalia lisäävästä valmistuksesta yleisesti, materiaalia lisäävällä valmistuksella saavutettavista hyödyistä, teknologioiden käyttöönottoon liittyvistä haasteista ja suunnittelusta materiaalia lisäävässä valmistuksessa. Teoriaosuudessa syvennyttään enemmän suorakerrostusmenetelmiin ja – prosesseihin, käytettäviin materiaaleihin, materiaalin syöttöön, suorakerrostuksen hyötyihin ja haasteisiin, jälkikäsittelyyn ja suorakerrostuslaitteisiin.

Teoriaosuudessa tehdään myös teknologiaselvitys, jossa arvioidaan teknologian maturiteettitasoa tällä hetkellä, kerrotaan teknologiaa edistävästä tekijöistä ja kehitysvaiheessa olevista suorakerrostusteknologioista ja tulevaisuuden näkymistä. Teknologiaselvityksessä arvioidaan myös materiaalia lisäävän valmistuksen vaikutuksia suunnitteluun ja tuotantoon tulevaisuudessa ja teknologian, hintojen ja markkinoiden kehitystä.

Soveltavassa osuudessa selvitetään haastatteluiden avulla suorakerrostuksella saavutettavia hyötyjä yrityksen tuotannossa. Haastatteluissa on käytetty puolistrukturoitua teema-haastattelua ja haastateltavat ovat olleet yrityksen henkilöstöä, tuotannosta, myynnistä ja teknisestä asiakaspalvelusta.

Työn tuloksena on perusteltu ehdotus materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämisestä yrityksen tuotannossa. Tällä hetkellä suorakerrostuksen hyödyntämismahdollisuudet rajoittuvat erilaisiin pinnoituksiin ja korjauksiin. Suorakerrostuksen suurimmat hyödyt luodaan suunnittelussa ja suorakerrostuksella valmistetut kappaleet tulisi suunnitella uudelleen, siten että perinteisen valmistuksen rajoitteet eivät ole enää rasitteena. Työn toimenpidesuosituksina on suorakerrostuksella saavutettavien materiaaliominaisuuksien selvittäminen, tuotteiden kehittämismahdollisuuksien selvittäminen yhdessä asiakkaan kanssa ja teknologian ja kustannusten kehityksen seuraaminen.

ABSTRACT

JUHO-PETTERI STORBERG: The Viability of Additive Manufacturing

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 71 pages, 3 Appendix pages

August 2017

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Production Engineering

Examiner: Associate Professor Minna Lanz and Tekn. lis. Jorma Vihinen

Keywords: Additive Manufacturing, Directed Energy Deposition, Maturity, Production, Designing

This research investigates possibilities to use additive manufacturing in the production of engineering works, which is specialized in demanding machining. The research clarifies different methods of additive manufacturing and the benefits and drawbacks of different methods. It also explains the importance of designing in additive manufacturing. This research focuses on directed energy deposition, different directed energy deposition methods and processes.

The main objectives of this research are to find out how the corporation could benefit from directed energy deposition in their production, which is the maturity level of directed energy deposition and how is the technology going to develop in the future. The theoretical part explains, based on literature research, generally about additive manufacturing, the benefits and drawbacks and designing for additive manufacturing. The theoretical part focuses more on directed energy deposition methods and processes, materials used, material supply, benefits, drawbacks and devices.

Theoretical part includes also technology study, which estimates the maturity level of directed energy deposition technology, explains the factors which are promoting this technology. Technology study explains also about developing directed energy deposition technologies and prospects. Technology study estimates also the development of technology, prices and markets and the effects of additive manufacturing to designing and production in the future.

The applied part researches, based on interviews, the benefits of additive manufacturing in the production of the corporation. Used interview method was semi-structured theme interview and the interviewees were employees of the corporation, from production, sales, and technical customer service.

The result of this research is reasoned proposal of utilization of additive manufacturing in the production of the corporation. At the moment the utilization possibilities are limited to different coatings and repairs. The main benefits of directed energy deposition are made in designing. That's why parts made with directed energy deposition should be re-designed, so that the constraints of traditional manufacturing are not affecting anymore. The recommended action of this research is to sort out the material properties, which are achieved with directed energy deposition, the possibilities to improve the products together with customer and to monitor the development of technology and prices.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ata Gears Oy:lle yrityksen kiinnostuksesta uutta tuotantoteknologiaa ja sen hyödyntämismahdollisuuksia kohtaan. Haluan kiittää kohdeyritystä erittäin mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta, sekä kaikkia työhön osallistuneita yrityksen edustajia, erityisesti työni ohjaajaa tuotantopäällikkö Jouni Kukkosta.

Tampereen teknillisen yliopiston puolelta haluan kiittää työni tarkastajia Associate Professor Minna Lanzia ja Tekn. lis. Jorma Vihistä hyvistä neuvoista ja ohjauksesta työn aikana.

Lisäksi haluan kiittää ystäviäni, perhettäni ja vanhempiani, ilman heidän tukeaan en olisi saanut opiskeluitani päätökseen. Erityisesti haluan kiittää Saaraa tuesta ja kannustuksesta työn aikana.

Keravalla, 24.10.2017

Juho-Petteri Storberg

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	Työn tausta, rajaus ja tavoitteet	1
1.2	Rakenne ja tutkimusmenetelmät	1
2	MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS	3
2.1	Materiaalia lisäävän valmistuksen yleinen prosessikuvaus	3
2.2	Metallien materiaalia lisäävä valmistus	6
2.3	Hyödyt	6
2.4	Haasteet	7
2.5	Suunnittelu materiaalia lisäävässä valmistuksessa	10
2.6	Materiaalia lisäävällä valmistuksella valmistettuja tuotteita	13
3	MENETELMÄT METALLIEN MATERIAALIA LISÄÄVÄSSÄ VALMISTUKSESSA	16
3.1	Jauhepetisulatus/ Powder bed fusion (PBF)	16
3.2	Sideaineen suihkutusta/ Binder jetting	18
3.3	Kerros laminointi/ Sheet lamination	18
3.4	Suorakerrostus/ Directed energy deposition (DED)	19
3.5	Suorakerrostuksesta syvemmin	20
3.5.1	Prosessi	20
3.5.2	Menetelmät	23
3.5.3	Laser	23
3.5.4	Elektronisuihku	24
3.5.5	Valokaari	25
3.5.6	Materiaalit	25
3.5.7	Metallijauheen syöttö	26
3.5.8	Langan syöttö	28
3.5.9	Hyödyt ja haasteet	29
3.5.10	Jälkikäsittely	31
3.5.11	Konevalmistajat	32
4	NYKYTILAKARTOITUS	35
4.1	Tuotannon nykytila	35
4.2	Valmistettavat tuotteet	35
4.3	Valmistusprosessi	36
4.4	Teknologiaselvitys	39
4.4.1	Materiaalia lisäävän valmistuksen maturiteettitaso	39
4.4.2	Digitaalinen materiaalia lisäävää valmistusta (DDM) edistävät tekijät 42	
4.4.3	Tulevaisuuden näkymät	42
4.4.4	Materiaalia lisäävän valmistuksen vaikutukset suunnitteluun ja tuotantoon tulevaisuudessa	44
4.4.5	Materiaalia lisäävän valmistuksen markkinoiden kehitys	45

4.4.6	Laitteiden ja materiaalien hintojen kehitys	47
5	MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN HYÖDYNTÄMINEN YRIYKSEN LIIKETOIMINNASSA.....	49
5.1	Puolistrukturoitu haastattelu.....	49
5.2	Haastatteluiden suorittaminen	50
5.3	Haastattelujen analysointi ja johtopäätökset	51
5.3.1	Hammaspyörien suorakerrostus	51
5.3.2	Hammaspyörien keventäminen	51
5.3.3	Hammaspyörien sisäiset kanavat	52
5.3.4	Hammaspyörien korjaukset.....	52
5.3.5	Hammaspyörien pinnoitukset	52
5.3.6	Hammaspyörien tuotanto	52
5.3.7	Uudet tuotteet.....	53
5.3.8	Henkilökohtaiset mielipiteet	54
5.3.9	Muut esille tulleet asiat	54
6	TULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI	55
6.1	Saavutettavissa olevat hyödyt	55
6.2	Teknologian sopivuus nykyiseen konekantaan	55
6.3	Minkälaisia kappaleita kannattaa valmistaa suorakerrostuksella.....	56
6.4	Impellerin suorakerrostus.....	58
6.4.1	Kustannusarvio 1.....	59
6.4.2	Kustannusarvio 2.....	62
6.4.3	Haasteet impellerien suorakerrostuksessa.....	63
6.5	Hammaspyörän suorakerrostus	64
6.5.1	Kustannusarvio.....	64
6.6	Perusteltu ehdotus materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämisestä	66
6.7	Tulosten arviointi	67
7	YHTEENVETO	68
7.1	Päätulokset ja niiden merkitys.....	68
7.2	Ehdotukset jatkotoimenpiteistä	68
7.3	Työn onnistuminen.....	69
	LÄHTEET.....	70

LIITE A: Tuotannon haastattelukysymykset

LIITE B: Teknisen asiakaspalvelun haastattelukysymykset

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer-aided Design
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CMM	Coordinate Measuring Machine
CMT	Cold Metal Transfer
CNC	Computerized Numerical Control
DED	Directed Energy Deposition
DfAM	Design for Additive Manufacturing
DLD	Direct Laser Deposition
DMD	Direct Metal Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DMT	Direct Metal Tooling
EBIT	Earnings Before Interest & Taxes
EBMD	Electron Beam Metal Deposition
FPI	Fluorescent Penetrant Inspection
HAZ	Heat Affected Zone
HIP	Hot Isostatic Pressing
JIT	Just-In-Time
LBMD	Laser-based Metal Deposition
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LMDS	Laser Metal Deposition Shaping
MIG	Metal Inert Gas
MRL	Manufacturing Readiness Level
MTRL	Manufacturing Technology Readiness Level
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PDM	Plasma Deposition Manufacturing
SLM	Selective Laser Melting
STL	STereoLithography

TIG	Tungsten Inert Gas Arc Welding
TRL	Technology Readiness Level
WAAM	Wire + Arc Additive Manufacturing

$C_{n/t}$	annuiteettitekijä
H	hankintahinta
I	laskentakorkokanta
n	investoinnin pitoaika
JA	investoinnin jäännösarvo

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta, raja- aus ja tavoitteet

Tämän diplomityön aiheena on metallien materiaalia lisäävä valmistus, sen maturiteettitason selvittäminen ja mahdollinen hyödyntäminen Ata Gears Oy:n tuotannossa. Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät ovat vielä kehitysvaiheessa olevia teknologioita, joiden hyödyntämismahdollisuuksia tutkitaan tällä hetkellä paljon, mutta teknologioita ei ole vielä otettu käyttöön teknologiateollisuudessa laajassa mittakaavassa.

Materiaalia lisäävästä valmistuksesta on tehty aiemmin bisnesselvitys, josta on ilmennyt että suorakerrostus-menetelmä voisi olla hyödyllinen yrityksen tuotannollisessa toiminnassa, ja menetelmä vaikuttaisi sopivimmalta yrityksen nykyiseen konekantaan. Tämä työ on jatkoa kyseiselle selvitykselle.

Työ rajataan siten, että metallien materiaalia lisäävässä valmistuksessa keskitytään suorakerrostusmenetelmään ja sen kannattavaan hyödyntämiseen yrityksen nykyisten ja uusien tuotteiden valmistuksessa. Työssä selvitetään erilaisia tapoja tuottaa lisäarvoa asiakkaalle ja yrityksen tuotannolle suorakerrostuksen avulla.

Työn tavoitteena on selvittää voisiko suorakerrostusta käyttää kannattavasti yrityksen tuotannossa tällä hetkellä tai mahdollisesti tulevaisuudessa. Tavoitteena on myös selvittää suorakerrostusteknologian maturiteettitaso ja mihin suuntaan teknologia on kehittymässä ja koska kyseiseen teknologiaan kannattaa investoida, vai kannattaako lainkaan.

1.2 Rakenne ja tutkimusmenetelmät

Työn rakenne koostuu teoriaosuudesta ja soveltavasta osuudesta. Teoriaosuus koostuu kirjallisuusselvityksestä, jonka avulla pyritään avaamaan materiaalia lisäävää valmistusta yleisesti. Materiaalia lisäävä valmistus- luvussa kuvataan materiaalia lisäävän valmistuksen yleinen prosessikuvaus, kerrotaan metallien materiaalia lisäävästä valmistuksesta, hyödyistä, haasteista ja suunnittelusta materiaalia lisäävässä valmistuksessa. Luvussa kerrotaan myös esimerkki kappaleista, jotka on valmistettu metallien materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä.

Menetelmät materiaalia lisäävässä valmistuksessa- luvussa avataan eri menetelmiä metallien materiaalia lisäävässä valmistuksessa ja kerrotaan syvemmin suorakerrostuksesta. Luvussa kerrotaan suorakerrostusprosessista, eri menetelmistä, suorakerrostuksessa käytettävistä materiaaleista, materiaalin syötöstä, suorakerrostuksen hyödyistä ja

haasteista, sekä suorakerrostuksella valmistettujen kappaleiden jälkikäsittelystä. Konevalmistajat- luvussa kerrotaan, minkälaisia suorakerrostuslaitteita on tarjolla tällä hetkellä.

Nykytilakartoitus- luvussa kerrotaan yrityksen nykytilasta, tuotteista ja kaarevahamapaisten kartiohammaspyörien valmistusprosessista. Tässä luvussa tehdään teknologiaselvitys, jossa selvitetään suorakerrostusteknologian maturiteettitaso, pohditaan materiaalia lisäävää valmistusta edistäviä tekijöitä ja kerrotaan materiaalia lisäävän valmistuksen tulevaisuuden näkymistä. Luvussa pohditaan myös materiaalia lisäävän valmistuksen vaikutuksia suunnitteluun ja tuotantoon tulevaisuudessa ja kerrotaan materiaalia lisäävän valmistuksen markkinoiden, laitteiden ja materiaalien hintojen kehityksestä.

Soveltavassa osuudessa selvitetään suorakerrostuksella saavutettavia hyötyjä yrityksen tuotteissa ja tuotannossa haastatteleamalla yrityksen henkilöstöä. Materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntäminen yrityksen liiketoiminnassa- luvussa kerrotaan haastattelumenetelmästä, haastatteluiden suorittamisesta ja tehdään analyysiä ja johtopäätöksiä haastatteluissa saadun tutkimusaineiston pohjalta.

Tulokset ja niiden arviointi- luvussa kerrotaan haastatteluiden ja teoriaosuuden perusteella suorakerrostuksella saavutettavista hyödyistä yrityksen liiketoiminnassa, teknologian sopivuudesta yrityksen nykyiseen konekantaan ja siitä, minkälaisia kappaleita kannattaa valmistaa suorakerrostuksella. Luvussa kerrotaan myös haastatteluissa esiin nousseen impellerin valmistuksesta suorakerrostuksella ja arvioidaan valmistuskustannuksia sekä perinteisellä koneistuksella että suorakerrostuksella. Luvussa tehdään myös perusteltu ehdotus materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämisestä yrityksen tuotannossa ja arvioidaan saatuja tuloksia.

Yhteenveto- luvussa kerrotaan työn päätuloksista ja niiden merkityksestä, ja tehdään ehdotuksia jatkotoimenpiteistä. Luvussa arvioidaan myös työn onnistumista.

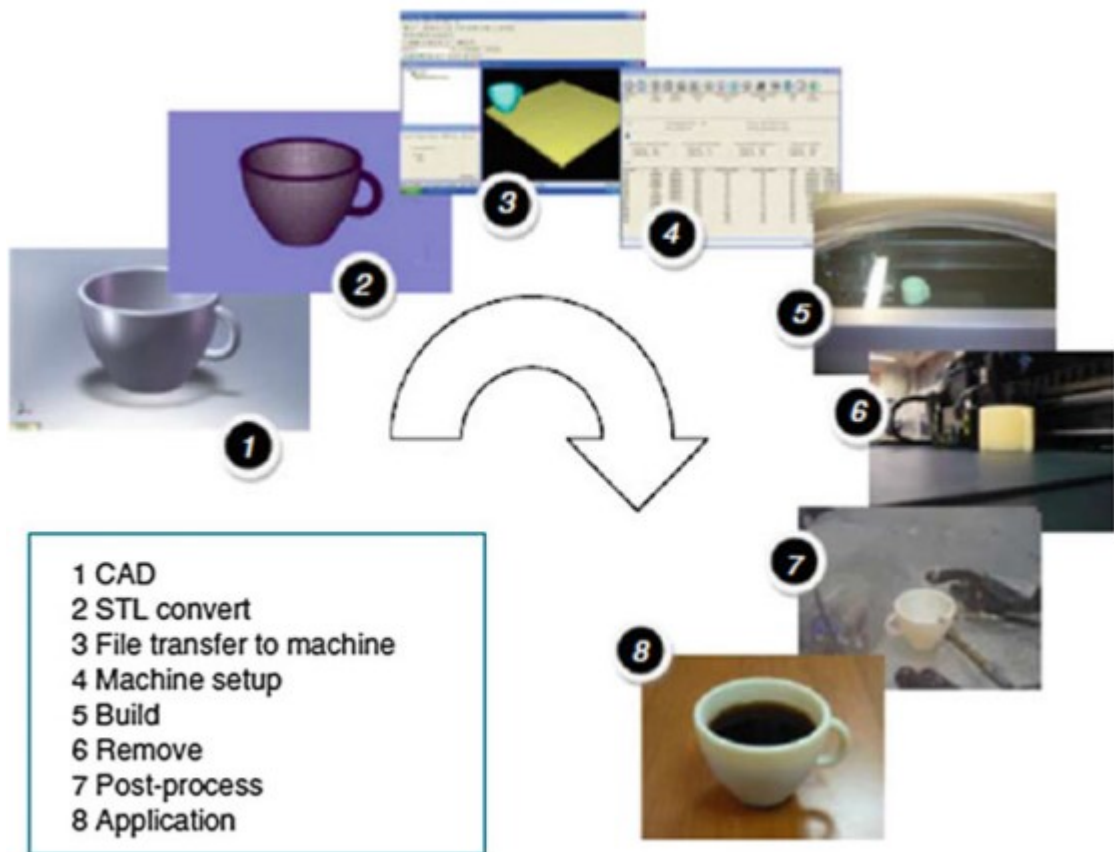
Työn merkittävimmät saavutukset ovat perusteltu ehdotus materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämisestä yrityksen tuotannossa, suorakerrostuksen maturiteettitason arvioiminen ja suunnittelun merkityksen selvittäminen suorakerrostuksen hyödyntämisessä.

Tutkimusmenetelminä on käytetty kirjallisuustutkimusta, haastatteluja, teknologia- ja markkinaselvitystä.

2 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS

2.1 Materiaalia lisäävän valmistuksen yleinen prosessikuvaus

Tämän luvun tavoitteena on antaa yleiskuva materiaalia lisäävän valmistuksen tärkeimmistä vaiheista. Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät koostuvat eri vaiheista, jotka tulee suorittaa oikeassa järjestyksessä, seuraava havainnollistaminen on yleistys ja jotkin materiaalia lisäävät menetelmät voivat vaatia enemmän työvaiheita. Materiaalia lisäävän valmistuksen yleistetty prosessi sisältää kahdeksan vaihetta, jotka on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Materiaalia lisäävän valmistuksen vaiheet (Gibson 2010, s.45)

Materiaalia lisäävän valmistuksen kahdeksan vaihetta ovat:

1 CAD:

Materiaalia lisäävän valmistuksen ensimmäinen työvaihe on valmistettavan kappaleen mallinnus. Kappaleen suunnittelussa keskitytään kappaleen toiminnollisuuteen ja muodostetaan kappaleesta visuaalinen malli. Seuraavaksi muodostetaan kappaleesta 3D-malli, joillain mallinnusohjelmalla tai 3D skannauksella. Muodostettu 3D mallissa ei saa olla aukkoja, koska ne voivat heikentää tulostuksen laatua tai aiheuttaa häiriön tulostusprosessissa.

2 Muuntaminen STL-muotoon:

Ennen kuin 3D-malli siirretään AM-laitteelle, täytyy 3D-malli muuttaa STL(STereoLit-hography) muotoon. STL tiedosto on approksimaatio alkuperäisen kiinteän mallin pinnoista ja se koostuu kolmiomaisista osista. Kolmioiden lukumäärä ja niiden koko osittain määrittää valmistettavan kappaleen pinnanlaadun. Parametreja voi säätää, kun tallentaa STL-tiedoston, mutta laitteen vaatima minimi resoluutio tulee olla määrittävä tekijä. Jos parametrit on määritetty väärin, voi kappaleen pinta olla huonolaatuinen. 3D-mallin muuntaminen STL muotoon on automaattinen prosessi, mutta siinä voi tapahtua virheitä. On kuitenkin kehitetty ohjelmistoja, jotka huomaavat ja korjaavat näitä virheitä.

3 STL-tiedoston siirtäminen AM-laitteelle:

Kun STL tiedosto on siirretty AM laitteelle, täytyy yleensä tehdä useita operaatioita, ennen kuin kappaleen valmistus voidaan aloittaa. Kappaleen paikka tulostusalustalla täytyy määrittää ja kappaleen koko voidaan skaalata tarvittaessa. On myös mahdollista valmistaa useita kopioita samasta kappaleesta samalla kerralla tai lisätä täysin uusia kappaleita samaan valmistusprosessiin.

4 AM-laitteen asetukset:

Koneen vaatimat asetukset riippuvat koneesta ja prosessista. AM laitteet jotka käyttävät vain muutamia materiaaleja ja kerrospaksuuksia, vaativat vähemmän muutoksia asetuksiin, kuin AM laitteet, jotka käyttävät useita eri materiaaleja ja kerrospaksuuksia. Laitteet jotka käyttävät useita materiaaleja ja kerrospaksuuksia, ovat hankalampia optimoida. AM laitteet mahdollistavat usein parametrien tallennuksen, jonka ansiosta samankaltaisen kappaleen valmistuksen vaatimat asetukset on mahdollista tehdä nopeammin. Kappaleen valmistaminen väärillä parametreilla on mahdollista, mutta yleensä se johtaa huonoon lopputulokseen kappaleen laadussa.

5 Valmistus:

Kappaleen valmistus on automaattinen prosessi, joka ei vaadi valvontaa muuta kuin ensimmäisten valmistuskerrosten osalta. Ensimmäisten kerrosten jälkeen tietokoneohjattu automatisoitu valmistus muodostaa kappaleen valmiiksi kerros kerrallaan. Laite vaatii kuitenkin yleistä valvontaa ongelmien varalta, kuten materiaalin riittävyyden varmistaminen ja mahdollisten laitteen häiriöiden korjaaminen.

6 Kappaleen poistaminen laitteesta:

Kappaleen poistaminen ja siivous on tärkeä vaihe kaikissa materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmissä. Tämä työvaihe on usein haastava ja hidas, mutta helpompaa se on sellaisissa prosesseissa, jotka eivät käytä tukirakenteita, tukirakenteiden poistaminen voi olla todella helppoa ja nopeaa tai vaikeaa ja hidasta, riippuen käytettävästä materiaalista ja prosessista. Metalliset tukirakenteet vaativat eniten työtä, ensin kappale täytyy irrottaa rakennusaluksistaan ja sen jälkeen tukirakenteet täytyy irrottaa kappaleesta siten, että kappale ei vaurioidu.

7 Jälkikäsittely:

Jälkikäsittelyn avulla tehdään kappaleelle vaadittavat toimenpiteet sen loppukäyttöä varten. Jälkikäsittely tehdään usein manuaalisesti ja se voi sisältää useita eri viimeistely vaiheita, kuten hiontoja ja pinnoituksia. Jälkikäsittelyn määrä riippuu kappaleen käyttökohteesta, jotkin kappaleet eivät välttämättä vaadi juurikaan jälkikäsittelyä, kun taas toiset voivat vaatia suuren määrän erilaisia jälkikäsittelytoimenpiteitä. Koneistusta voidaan vaatia, jos AM laitteen tuottama pinnanlaatu ei ole riittävää kappaleen vaatimuksiin nähden. Jotkin AM prosessit tuottavat hauraita kappaleita, jotka vaativat lämpökäsittelyä tai pinnoituksia kappaleen lujuusominaisuuksien parantamiseksi.

8 Käyttö:

Materiaalia lisäävällä valmistuksella valmistetut kappaleet ovat erilaisia kuin perinteisillä menetelmillä valmistetut kappaleet, kuten valut. Kappaleissa voi esiintyä virheitä, jotka johtuvat huonosta materiaalin sitoutumisesta, joka voi johtaa kappaleen heikompaan kyynele kestää mekaanista rasitusta. Materiaalia lisäävä valmistus johtaa usein anisotropisiin kappaleen ominaisuuksiin, jotka voivat olla joko hyödyllisiä tai haitallisia käyttökohteesta riippuen. (Gibson *et al.* 2010, s.43- 49.)

2.2 Metallien materiaalia lisäävä valmistus

Metallien materiaalia lisäävä valmistus on kehittynyt viime vuosina siten, että erilaisilla menetelmillä voidaan tehdä toiminnallisia prototyyppkejä, varaosia tuotannollisiin tarpeisiin tai lisääntyvissä määrin myös valmiita tuotantokappaleita (Chekurov *et al.* 2017, s. 7.)

Metallien materiaalia lisäävää valmistusta käytetään sellaisessa teollisuudessa, jossa valmistetaan räätälöitäviä ja varioituvia tuotteita, tuotteita, joiden valmistaminen on helpompaa materiaalia lisäämällä ja joissa painon vähentäminen, sisäisten kanavien valmistaminen ja kokoonpanon tulostaminen on hyödyllistä. Menetelmää käytetään myös jos eri materiaalien yhdistämisellä ja pinnoituksilla voidaan saavuttaa hyötyjä tuotteen toiminnollisuuteen.

Metallien materiaalia lisäävää valmistusta on käytetty etenkin lentokoneeteollisuudessa, missä kappaleiden keveydellä on suuri merkitys. Muita käyttäjiä ovat esimerkiksi lääke-teollisuus ja ortopedisten implanttien valmistus. Myös koru-, taide- ja koristevalmistajat ovat käyttäneet metallien materiaalia lisäävää valmistusta. Myös erilaiset niche-tuotteiden valmistajat ovat käyttäneet menetelmää esimerkiksi suodattimien valmistuksessa, jolloin on saavutettu parempi virtaustehokkuus ja energiansäästöä. (Gibson *et al.* 2010, s. 9-10.)

2.3 Hyödyt

Materiaalia lisäävällä valmistuksella voidaan saavuttaa monia hyötyjä. Toisin kuin valut ja koneistus, materiaalia lisäävä valmistus ei vaadi erillisiä työkaluja, jolloin tuotannossa ei ole myöskään työkalujen aiheuttamia rajoituksia. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa tuote-mixin vaihtelun, sillä muutettaessa valmistettavaa tuotetta, tehdään muutos vain CAD-malliin, eikä tarvitse tehdä muutoksia tuotantojärjestelmään. CAD-mallin helposti tapahtuva muokkaus mahdollistaa myös tilausten perusteella tapahtuvan yksilöllisen tuotannon ja nopean reagoinnin muuttuviin markkinatilanteisiin.

Tuotantomäärien sopeuttaminen kysyntään on helpompaa materiaalia lisäävällä valmistuksella, sen joustavuuden ansiosta. Materiaalia lisäävällä valmistuksella voidaan saavuttaa tehokas JIT tuotanto, yhden kappaleen virtaus ja varastojen pieneneminen, koska kappaleita voidaan valmistaa vain tarpeen mukaan yhdellä työvaiheella. Tehokkaan JIT tuotannon ansiosta voidaan saavuttaa säästöjä tehdastilan, varastojen ja tuotannon erilaisten hukkien vähenemisen ansiosta. (Gibson *et al.* 2010, s. 9; Wohlers 2014, s. 171-173.)

Materiaalia lisäävä valmistus on hyödyllinen menetelmä tuotteen sellaisten osien valmistuksessa, jotka vaativat yksilöllisyyttä ja varioituvuutta ja sen avulla voidaan tulostaa yksi monimutkainen kokonaisuus ja siten vähentää kokoonpanotyötä. Menetelmällä voidaan

valmistaa tuotteita samoilla toiminnallisilla ominaisuuksilla, mutta pienemmällä materiaalin määrällä, jolloin materiaalia on vain siellä, missä sitä tarvitaan. Topologista optimointia hyödyntämällä voidaan valmistaa ristikkorakenteita, jolloin saadaan kappaleista kevyempiä vähentämällä materiaalia sieltä, missä sitä ei tarvita. Etenkin Ilmailu ja auto-teollisuudessa on hyödyllistä vähentää osien painoa, jolloin kevyemmät osat aiheuttavat säästöjä elinkaarensa aikana (Thompson *et al.* 2016).

Materiaalin vaihtaminen kesken tulostuksen mahdollistaa kappaleiden toiminnollisten ominaisuuksien kehittämisen, LENS- ja DMD suorakerrostusmenetelmillä voidaan vaihtaa materiaalia kesken tulostuksen milloin vain, muissa menetelmissä materiaalia voidaan vaihtaa kerroksittain. (Thompson *et al.* 2016)

Pulveri materiaalia voidaan myös uudelleen käyttää, mutta uudelleenkäyttö voi heikentää materiaalin laatua, sillä uudelleen käytetty materiaali ei ole välttämättä laadultaan enää yhtä hyvää kuin kierrättämätön materiaali. (Gibson *et al.* 2010, s. 9.)

2.4 Haasteet

Materiaalia lisäävän valmistuksen tuotannollisessa hyödyntämisessä on useita haasteita. Jotta teknologia kannattaisi ottaa käyttöön, täytyy sen vähentää tuotannon kustannuksia tai lisätä tuotteen arvoa tai tehdä molempia. Laitteet ja materiaalit ovat tällä hetkellä melko kalliita ja lisäksi laitteiden ylläpito ja huolto on kallista. Koneiden ja materiaalin kallis hinta johtuu alhaisista myyntimääristä ja kalliista komponenteista, mutta kun koneiden myyntimäärät ja kilpailu lisääntyvät, on hinnoissa odotettavissa laskua.

Patenttien rauetessa ja kilpailun vapautuessa voi koneiden hinnat pudota melko paljon, näin on tapahtunut kuluttajien 3D-tulostimien myyntihinnoissa. Teknologian ja prosessien kehittyessä, saadaan myös tulostusnopeutta kasvatettua, jolloin tuotteelle kohdistuvat koneen hankintakustannukset laskevat.

Materiaalia lisäävän valmistuksen käyttäminen massatuotannossa perinteisten menetelmien tapaan ei ole todennäköisesti kannattavaa, esimerkiksi perinteisen valun ja koneistuksen korvaaminen materiaalia lisäävällä valmistuksella ei todennäköisesti ole kannattavaa.

Laskettaessa valmistuskustannuksia tulee huomioida kuitenkin menetelmällä saavutettavat mahdolliset säästöt tuotteen elinkaaren aikana. Esimerkiksi lentokoneen osat saavat olla moninkertaisesti kalliimpia, koska ne säästävät kyseisen hintaeron elinkaarensa aikana polttoainekuluissa keveytensä ansiosta.

Muutosvastarintaa voidaan pitää suurimpana haasteena materiaalia lisäävän valmistuksen käyttöönotossa. Sen käyttöönotto vaatii radikaalin ajattelutapamuutoksen, sillä materiaalia lisäävä valmistus eroaa paljon perinteisestä valmistuksesta niin suunnittelun kuin tuotannonkin osalta.

Materiaalia lisäävä valmistus on teknologiana vielä uusi ja se kehittyy koko ajan. Teknologia ei ole saavuttanut vielä täydellistä kypsyysastetta ja siitä aiheutuvia haasteita ovat muun muassa laadun tasaisuuden haasteet, koska teknologia ei ole vielä käytössä laajassa mittakaavassa, ei voida olla varmoja laadun tuoton tasaisuudesta pitkällä aikavälillä.

Materiaalia lisäävien menetelmien tarkkuus riippuu tulostusnopeudesta, jos halutaan tulostaa kappaleita nopeasti, kärsii tulostuksen tarkkuus. Tarkka tulostus on hidasta pienen tulostusalan ja tulostusvauhdin takia. Nopeampi tulostus on epätarkempaa ja pinnanlaadultaan huonompaa. Optimaalisen tulostustason saavuttamiseksi pitää tehdä kompromisseja tulostusnopeudessa, ja – tarkkuudessa.

Myös erilaisten standardien kehittäminen on vielä kesken. Kuvassa 2 on listattu ASTM:n materiaalia lisäävän valmistuksen tällä hetkellä saatavilla olevia standardeja.

List of additive manufacturing technology standards developed by ASTM:

Jump to:

Design



GO

Design

Designation	Title
ISO / ASTM52915 - 16	Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2
ISO / ASTM52910 - 17	Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing

Materials and Processes

Designation	Title
F2924 - 14	Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion
F3001 - 14	Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) with Powder Bed Fusion
F3049 - 14	Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes
F3055 - 14a	Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion
F3056 - 14e1	Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06625) with Powder Bed Fusion
F3091 / F3091M - 14	Standard Specification for Powder Bed Fusion of Plastic Materials
F3184 - 16	Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion
F3187 - 16	Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals
ISO / ASTM52901 - 16	Standard Guide for Additive Manufacturing – General Principles – Requirements for Purchased AM Parts

Terminology

Designation	Title
ISO / ASTM52900 - 15	Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology

Test Methods

Designation	Title
F2971 - 13	Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing
F3122 - 14	Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes
ISO / ASTM52921 - 13	Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies

Kuva 2. Lista ASTM:n materiaalia lisäävän valmistuksen saatavilla olevista standardeista. (ASTM INTERNATIONAL verkkosivu: <https://www.astm.org/Standards/additive-manufacturing-technology-standards.html>)

Suurten lämpöenergioiden takia erilaisista menetelmistä riippuen materiaalia lisäävä valmistus voi vaatia erilaisia suojauksia, kuten eristeitä ja happipitoisuuden vähentämistä suojakaasun avulla. Pulverimenetelmissä tulee huomioida myös materiaalin käsittelyn vaatimukset, pulverimateriaaleja tulee käsitellä kuivassa ympäristössä ja pulverilta tulee suojautua, sillä jotkin pulverit ovat palovaarallisia, pulvereita ei saa hengittää ja ylimääräinen pulveri voi tehdä työpisteestä liukkaan.

Erilaiset laitteet vaativat tarkkaa ja hyvää ylläpitoa ja huoltoa, koska lasermenetelmät ovat herkkiä ja niitä ei tulisi käyttää likaisessa ympäristössä. Laitteet vaativat säännöllisiä tarkistuksia ja kokeita, joilla varmistetaan laitteen toiminnollisuus. (Gibson *et al.* 2010, s. 53-56; Wohlers 2014, s. 174-176.)

2.5 Suunnittelu materiaalia lisäävässä valmistuksessa

Perinteisesti suunnittelussa suunnittelijan tehtävänä on suunnitella mahdollisimman yksinkertaisia, helposti valmistettavissa olevia tuotteita, jotka minimoivat valmistusprosessissa syntyviä valmistus-, kokoonpano- ja logistiikkakustannuksia.

1980 ja 1990 luvuilla tuotekehitys koki merkittäviä muutoksia, kun yhtiöt, kuten Boeing, Pratt & Whitney ja Ford uudelleen organisoivat tuotekehityksen, siten että tuotekehitystiimissä oli insinöörejä suunnittelusta, valmistuksesta ja muista toiminnoista. Nämä tiimit saattoivat koostua sadoista ja jopa tuhansista henkilöistä, jotta mahdollisimman hyvin pystyttiin varmistamaan jo tuotekehittely vaiheessa että tuote pystytään valmistamaan käytössä olevilla valmistusresursseilla ja tehtaan muilla resursseilla ja että tuote vastaa asiakkaan tarpeisiin. Tällä toimintatavalla pyrittiin siihen, että pystytään välttämään uudelleen suunnittelua, työkalujen hankintaa ja valmistusprosessin muuttamista. Myöhemmin on tehty erilaisia ohjeistuksia ja sääntöjä suunnittelijoille, joiden avulla suunnittelijat pystyvät arvioimaan kappaleen valmistettavuutta.

Valmistusprosessit ovat siis rajoittaneet suunnittelijoiden työtä ja suunnittelijoiden tehtävänä on ollut suunnitella sellaisia tuotteita, jotka ovat valmistettavissa valmistusprosessin rajoitteet huomioiden. Materiaalia lisäävä valmistus muuttaa tätä ajattelutapaa radikaalisti, sillä materiaalia lisäävällä valmistuksella on paljon vähemmän rajoitteita ja enemmän ainutlaatuisia ominaisuuksia, joita ovat muotojen kompleksisuus, rakenteen hierarkkinen kompleksisuus, materiaalin kompleksisuus ja toiminnallinen kompleksisuus.

Muotojen kompleksisuudella tarkoitetaan sitä että on periaatteessa mahdollista valmistaa mitä tahansa muotoja. Rakenteen hierarkkisella kompleksisuudella tarkoitetaan sitä, että valmistettaessa tuotetta kerros kerrallaan, voidaan valmistaa rakenteeltaan erittäin kompleksia tuotteita. Materiaalin kompleksisuudella tarkoitetaan että materiaalia voidaan tulostaa eri tavalla eri pisteissä ja kerroksissa, siten että materiaali vaihtuu kappaleen valmistuksen aikana. Toiminnallisella kompleksisuudella tarkoitetaan, että materiaalia lisäävällä valmistuksella voidaan valmistaa kerralla valmiiksi toimivia kokonaisuuksia, jotka ovat aiemmin valmistettu osakokoonpanoina.

Kyseisien ominaisuuksien avulla voidaan valmistaa aiempaa kustomoidummin toimivampia kappaleita, joiden kokonaisvalmistuskustannukset ovat perinteisiä kappaleita alemmat.

Muotojen kompleksisuuden avulla materiaalia lisäävällä valmistuksella voidaan valmistaa kustomoidusti suunniteltuja kappaleita pieniä eriä, sillä materiaalia lisäävä valmistus ei tarvitse kiinnityksiä ja työkaluja, kuten perinteinen koneistus. Lisäksi valmistusprosessi on pitkälle automatisoitu, joten materiaalia lisäävä valmistus vaatii yksinkertaisimmillaan vain 3D CAD-mallin muuttamisen tulostimen ymmärtämään muotoon.

Rakenteen hierarkkisen kompleksisuuden avulla kappaleen rakennetta voidaan muuttaa aiempaa monimutkaisemmaksi. Kappaleen rakenne voi sisältää esimerkiksi ristikkorakenteita, eli materiaalia on vain siellä, missä sitä tarvitaan. Hierarkkisen kompleksisuuden avulla voidaan optimoida esimerkiksi kappaleen lujuusominaisuuksia ja painoa.

Materiaalien kompleksisuuden avulla voidaan suunnitella ominaisuuksiltaan sellaisia tuotteita, joita ei ole voitu perinteisillä menetelmillä valmistaa. Tulostusparametreja ja materiaaleja muuttamalla voidaan valmistaa rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan paljon toimivampia tuotteita, kuin perinteisessä valmistuksessa.

Toiminnallisen kompleksisuuden avulla voidaan valmistaa suoraan valmiita toiminnallisia kokonaisuuksia, eikä tarvitse suunnitella eri osien kokoonpantavuutta ja valmistettavuutta. Toiminnallinen kompleksisuus mahdollistaa kokoonpanotyön vähentämisen ja usein myös kokoonpanon toiminnollisuuden parantamisen. (Gibson *et al.* 2010, s. 399-434; Wohlers. 2014, s. 176-177.)

Suunnittelu materiaalia lisäävässä valmistuksessa tulisi maksimoida tuotteen toiminnallisuuden kappaleen muotojen, koon, hierarkkisen rakenteen ja eri materiaalien yhdistelmien avulla. Suunnittelijalle voidaankin antaa seuraavia ohjeistuksia materiaalia lisäävään valmistukseen liittyen (Gibson *et al.* 2010, s. 399-434.):

1. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa kappaleen monimutkaisen geometrian, ilman että kappaleen valmistusaika tai –kustannukset nousevat
2. Usein on mahdollista yhdistää osia monimutkaiseen kokonaisuuteen ja välttää kokoonpanoa
3. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa kustomoidun geometrian ja suoran valmistuksen 3D-mallin perusteella
4. Eri materiaalien yhdistämisen yleistyessä suunnittelijoiden tulisi tutkia minkälaisia mahdollisuuksia geometrian ja materiaalin kompleksisuudella voidaan saavuttaa
5. Suunnittelija voi unohtaa kaikki perinteisen valmistuksen aiheuttamat rajoitteet

Materiaalia lisäävän valmistuksen rajoitteena ei enää ole valmistuksen rajoitteet, vaan suunnittelijoiden innovatiivisuus ja kyky ajatella tuotteita uudella tavalla. Suunnittelijoilta vaadittavaa ajattelutapamuutosta voidaan pitää materiaalia lisäävän valmistuksen käyttöönoton suurimpana haasteena (Wohlers. 2014, s. 176-177.). Suunnittelijoilla on kuitenkin mahdollisuus kääntää tämä rajoite mahdollisuudeksi luoda uudenlaisia aiempaa parempia tuotteita. (Gibson *et al.* 2010, s. 399-434.)

Suunniteltaessa tuotteita materiaalia lisäävällä valmistuksella valmistettavaksi kannattaa suunnittelu aloittaa alusta perustuen asiakastarpeisiin ja toiminnallisiin vaatimuksiin, jotta perinteisen valmistuksen rajoitukset eivät vaikuta tuotteen geometriaan ja ominaisuuksiin. (Chekurov *et al.* 2017, s. 28.)

Materiaalia lisäävän valmistuksen suunnitteluun (DfAM) liittyvän tietämyksen, työkalujen, sääntöjen, prosessien ja metodien kehityksen hitaus on yksi tekninen haaste, jonka takia materiaalia lisäävä valmistus ei ole yleistynyt laajemmassa mittakaavassa. Suunnittelun opetusta ja standardeja tarvitaan myös materiaalia lisäävän valmistuksen yleistyksessä. Esimerkiksi Materialise on julkaissut 19 suunnitteluopasta eri materiaaleille. (Materialise NV 2015)

Suunnittelijoiden CAD-mallien tulee olla täydellisiä digitaalisia malleja valmiista kappaleesta, koska toisin kuin perinteisessä valmistuksessa, materiaalia lisäävässä valmistuksessa ei ole niin suurta ihmiskontaktia, vaan valmistus on täysin automatisoitua CAD-mallin perusteella, siksi mallin täytyy sisältää enemmän informaatiota. Perinteiset CAD-sovellukset eivät pysty mallintamaan huokoisia ristikkorakenteita ja määrittämään kappaleen sisällä tapahtuvia materiaali muutoksia.

CAD-mallinnusohjelmien rajoitteita voidaan osittain helpottaa käänteisellä suunnittelulla (reverse engineering), jossa haluttu kappale voidaan mallintaa laserskannauksen avulla. Myös kosketukseen perustuva mallinnus (haptic modeling) helpottaa vaikeiden muotojen suunnittelua.

Tutkijat ovat kuitenkin suunnittelemassa uusia tiedostomuotoja, joiden avulla voidaan ratkaista CAD:iin ja digitalisaatioon liittyviä haasteita. (Thompson *et al.* 2016)

CAD-ohjelmilla on perinteisesti suunniteltu kiinteitä kappaleita perinteisen valmistuksen rajoitteet huomioiden. Materiaalia lisäävän valmistuksen vaatimukset CAD-ohjelmille ovat paljon perinteistä valmistusta suuremmat. Joissain tilanteissa CAD-ohjelma on rajoitteena tuotteen valmistamiseksi, koska ohjelmistot eivät pysty käsittelemään uudenlaisia muotoja ja monimutkaisia rakenteita. CAD-ohjelmien rajoitukset voivatkin olla yksi rajoite materiaalia lisäävän valmistuksen käyttöönotossa.

Haasteet CAD-ohjelmissa ovat:

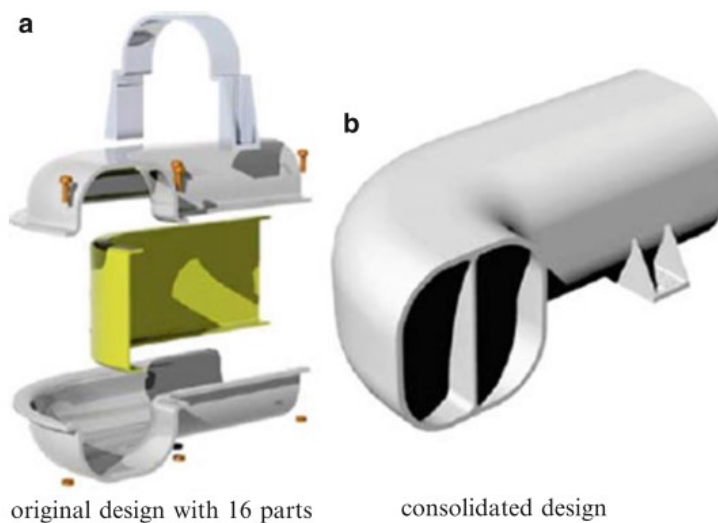
1. Geometrian kompleksisuus, jonka takia malli voi sisältää kymmeniä ja jopa satoja tuhansia piirteitä
2. Fyysisen materiaalin esittäminen, jolla tarkoitetaan sitä että materiaalien yhdistyminen ja jakautuminen täytyy esittää 3D-mallissa
3. Fyysisten ominaisuuksien esittäminen, jolla tarkoitetaan sitä, että halutut fyysiset ja mekaaniset ominaisuudet ja niiden jakautuminen tulee esittää 3D-mallissa

Perinteiset CAD-ohjelmat kuten SolidWorks ja CATIA ovat hyviä perinteisten kappaleiden suunnittelussa, joissa on yleensä kymmeniä tai satoja erilaisia pintoja. Mutta suunniteltaessa materiaalia lisäävälle valmistukselle monimutkaisia tuotteita, jotka saattavat sisältää tuhansia pintoja, toimivat kyseiset ohjelmat erittäin hitaasti ja käyttävät satoja MB tai useita GB muistia. (Gibson *et al.* 2010, s. 418.)

Ohjelmistovalmistajilla on kuitenkin kehittäneet ohjelmistoja, joiden avulla voidaan suunnitella tuotteita materiaalia lisäämällä valmistettaviksi. AutoDesk saattaa olla ensimmäinen ohjelmistovalmistaja, joka tarjoaa kattavan ohjelmiston materiaalia lisäävän valmistuksen tarpeisiin. (Berger 2016 s. 17.)

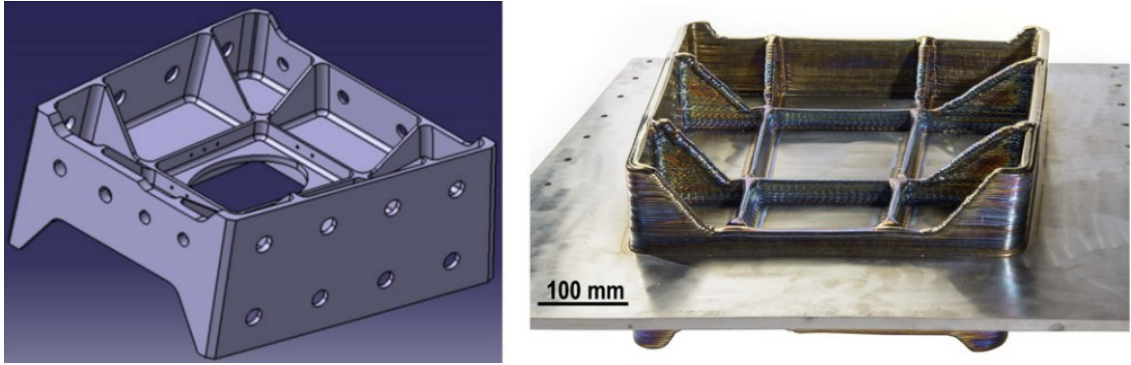
2.6 Materiaalia lisäävällä valmistuksella valmistettuja tuotteita

Materiaalia lisäävää valmistusta käytetään sellaisten tuotteiden valmistuksessa, jotka vaativat yksilöllisyyttä ja varioituvuutta ja sen avulla voidaan tulostaa yksi monimutkainen kokonaisuus ja siten vähentää kokoonpanotyötä. (Thompson *et al.* 2016) Kuvassa 3 on esimerkkikappaleena lentokoneen kanava, jossa on tulostamalla saatu yhdistettyä 16 osaa yhdeksi kokonaisuudeksi.



Kuva 3. Lentokoneen kanava, jossa tulostamalla yhdistetty 16 osaa. (Gibson 2010, s. 404.)

Materiaalia lisäävällä valmistuksella voidaan valmistaa tuotteita samoilla toiminnallisilla ominaisuuksilla, mutta pienemmällä materiaalin määrällä, jolloin materiaalia on vain siellä, missä sitä tarvitaan. Topologista optimointia hyödyntämällä voidaan valmistaa ristikkorakenteita, jolloin saadaan kappaleista kevyempiä vähentämällä materiaalia sieltä, missä sitä ei tarvita. Etenkin Ilmailu ja autoteollisuudessa on hyödyllistä vähentää osien painoa, jolloin kevyemmät osat aiheuttavat säästöjä elinkaarensa aikana (Thompson *et al.* 2016). Kuvissa 4 ja 5 on materiaalia lisäävällä valmistuksella valmistettuja lentokoneen osia.

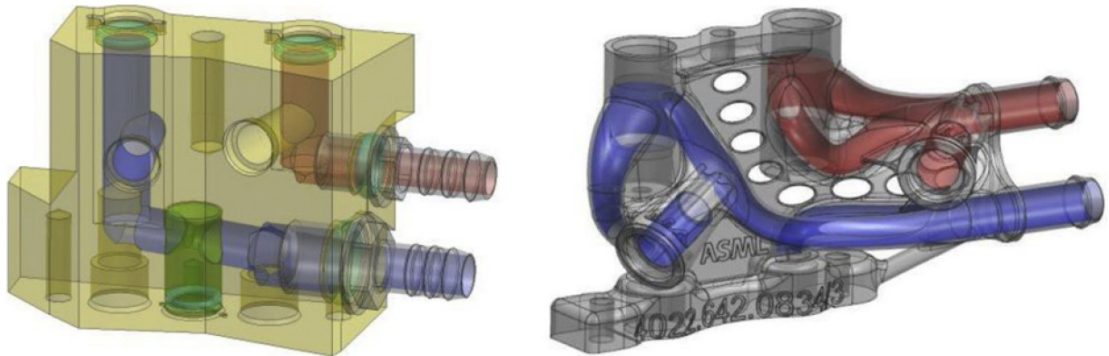


Kuva 4. Vahvistuskappale valmistettu WAAM(Wire + Arc Additive Manufacturing) menetelmällä materiaalista Ti-6Al-4V. CAD-malli vasemmalla ja tulostettu kappale ennen koneistusta oikealla. (Thompson et al. 2016)

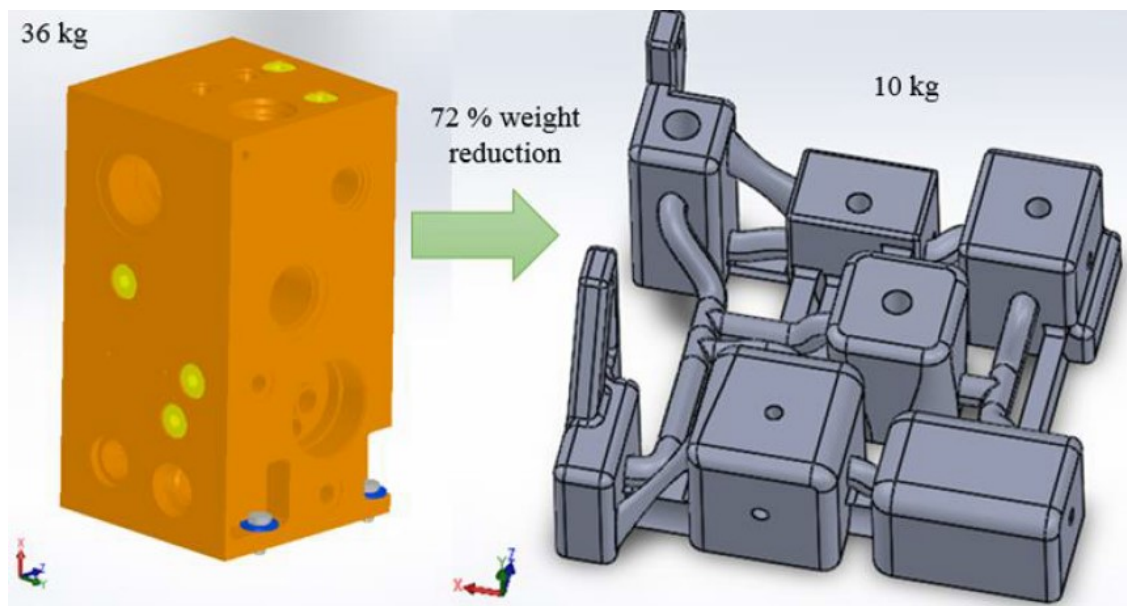


Kuva 5. Perinteinen CAD-malli ja topologian optimoinnin avulla uudelleen suunniteltu ja DMLS (direct metal laser sintering) menetelmällä valmistettu Airbus A320 sarana ja Airbus A380 kannatin. Materiaaleina titaani (vas.) ja ruostumaton teräs (oik.) (Thompson et al. 2016)

Materiaalia lisäävällä valmistuksella voidaan valmistaa entistä toimivampia tuotteita, koska perinteisen valmistuksen rajoitteet eivät ole enää esteenä tuotteiden toiminnollisuuden kehittämiseksi. (Gibson et al. 2010, s.399-434.) Kuvissa 6 ja 7 on materiaalia lisäävällä valmistuksella valmistettuja kappaleita, joiden toiminnollisuutta on saatu kehitettyä materiaalia lisäävän valmistuksen avulla.



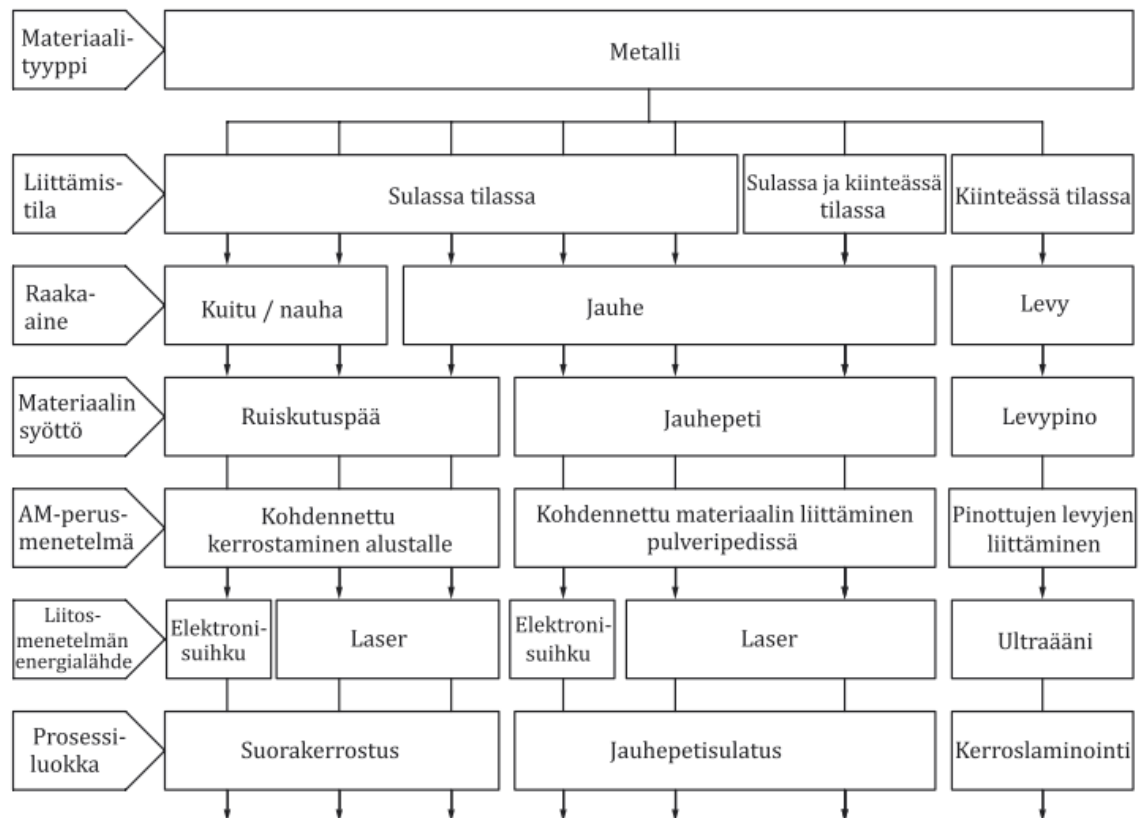
Kuva 6. Veden jakotukki, joka on uudelleen suunniteltu ja valmistettu titaanista materiaalia lisäävällä valmistuksella. Optimoitu versio vähensi turbulenssista aiheutuvia värähtelyitä 90% (Thompson et al. 2016)



Kuva 7. Uudelleen suunniteltu ja SLM (Selective Laser Melting) menetelmällä valmistettu hydraulilohko. Uudelleen suunnittelulla saavutettu 72% painonvähennys ja parempi toiminnollisuus sulavampien kanavien ja ylimääräisten porausten poistamisen ansiosta. (Hovilehto 2016 s. 83)

3 MENETELMÄT METALLIEN MATERIAALIA LISÄÄVÄSSÄ VALMISTUKSESSA

Metallien materiaalia lisäävässä valmistuksessa on kolme erilaista menetelmää, joiden avulla voidaan valmistaa kappaleita yhdessä vaiheessa siten, että vain jälkikäsittely, kuten tukirakenteiden poistaminen ja pinnan viimeistely on tarpeellista tulostusprosessin jälkeen. Seuraavassa kuvassa 8 on yleiskatsaus yhden vaiheen metallien materiaalia lisääviin menetelmiin:

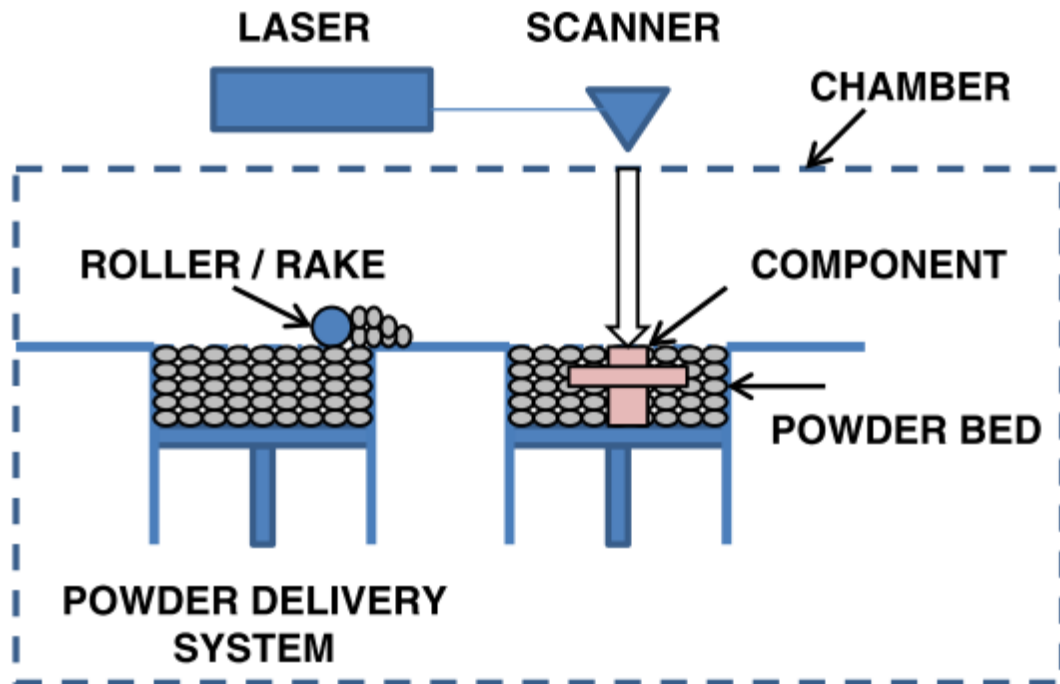


Kuva 8. Yleiskatsaus yhden vaiheen metallien materiaalia lisäävistä menetelmistä (SFS-ISO/ASTM 52900:2016, s. 17)

3.1 Jauhepetisulatus/ Powder bed fusion (PBF)

Jauhepetimenetelmässä jauhetta syötetään ohuita kerroksia ja sulatetaan jokainen kerros laserilla halutuista kohdista siten, että haluttu geometria muodostuu kerros kerrokselta,

prosessi tapahtuu suojakaasussa. Ylimääräinen jauhe jää muodostetun kappaleen ympärille ja toimii siten tukena tulostuksen aikana. Kuva 9 havainnollistaa jauhepetimenetelmän toimintaperiaatetta.



Kuva 9. Jauhepetimenetelmän yleinen toimintaperiaate (Frazier 2014, s. 3)

Jauhepetimenetelmässä tarvitaan usein tukirakenteita, joiden avulla pystytään tulostamaan monimutkaisia muotoja siten, että tulostus on mahdollista ja kappale säilyttää muotonsa eikä vääntymiä synny. Tukirakenteiden avulla saadaan myös johdettua lämpöä kappaleesta tulostusalustaan, sillä jauhe toimii eristeenä ja lämmön siirtyminen on muuten vähäistä.

Jauhepetimenetelmää käytettäessä kappaleen orientaation suunnitteleminen on erittäin tärkeää, sillä oikealla orientaatiolla voidaan vähentää merkittävästi tukien tarvetta tulostuksen aikana. Kappaletta suunniteltaessa kannattaa miettiä rakennetta siten, että tukirakenteet ovat osa kappaletta, jolloin tukirakenteiden poistaminen ja jälkikäsittely vähenee. Kappale vaatii kuitenkin jonkinlaiset tukirakenteet tulostusalustaan, sillä tulostusta ei voi tehdä tyhjän päälle ja ilman tukia kappale vääntyy tulostuksen aikana. Tulostuksen jälkeen ylimääräinen jauhe poistetaan, tehdään mahdollinen jännityksenpoistohehkutus ja kappale irrotetaan alustasta. Sen jälkeen tukirakenteet irrotetaan kappaleesta ja kappaleen pinta viimeistellään.

Jauhepetimenetelmässä voidaan käyttää paljon erilaisia metallimateriaaleja. Nyrkkisään-
tönä voidaan pitää, että kaikki metallit mitä voidaan hitsata, voidaan myös tulostaa jau-

hepetimenetelmällä. Jauhepetimenetelmän tarkkuus riippuu tulostusolosuhteista ja käytettävän materiaalijauheen rakenteesta, mitä hienompaa jauhe on, sitä tarkemmin sitä pystytään tulostamaan.

Jauhepetimenetelmä on yksi ensimmäisistä käytetyistä materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmistä. Se on myös suosituin ja eniten kasvussa oleva menetelmä materiaalia lisäävässä valmistuksessa. Etenkin ilmailu- ja lääketiedesovelluksissa kyseinen menetelmä on yleistymässä, kompleksisten geometrioiden ja ainutlaatuisten materiaaliominaisuuksiensa ansiosta. (Gibson *et al*, 2010)

3.2 Sideaineen suihkutetus/ Binder jetting

Sidosaine suihkutetus on materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä, jossa sidosmateriaalia suihkutetaan jauhepetisulatuksen kaltaisella menetelmällä. Menetelmä onkin hyvin samankaltainen kuin jauhepetisulatus, mutta laserin sijaan materiaalia kerrostetaan sidosaineen avulla.

Tulostuksen jälkeen kappale jätetään hetkeksi laitteeseen, jotta sidosaine ehtii vaikuttamaan ja sitomaan materiaalikerrokset toisiinsa. Jälkikäsitellyssä kappale poistetaan tulostimesta ja ylimääräinen jauhe puhdistetaan kappaleesta paineilman avulla. (Gibson *et al*, 2010, s.205-217) Puhdistettu kappale sintrataan ja infiltroidaan toisella materiaalilla kestävyuden ja muiden mekaanisten ominaisuuksien parantamiseksi (Chekurov *et al*. 2017, s.8). Kappaleita voidaan käyttää toiminnallisina prototyyppeinä ja menetelmää voidaan hyödyntää hiekkavalumuottien tekemiseen. (Gibson *et al*, 2010, s. 205-217.)

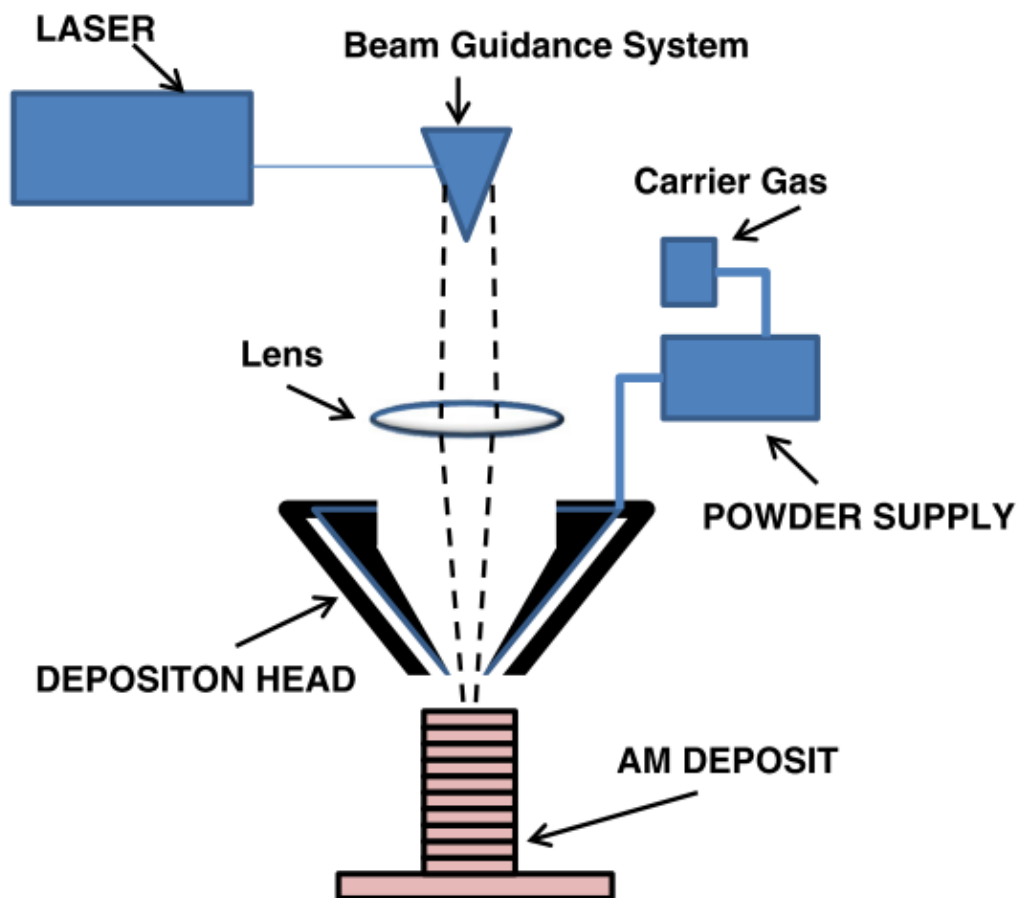
3.3 Kerroslaminointi/ Sheet lamination

Yleisimmässä laminointimenetelmässä on materiaalina paperi, jota leikataan haluttuun muotoon laserin avulla ja liimataan kerroksittain polymeeri-pohjaisella liimalla, lämpöä hyväksikäyttäen. Menetelmissä käytetään kahta eri tapaa, toisessa tavassa kerrokset liimataan ensin ja sitten leikataan, ja toisessa leikataan ensin ja liimataan vasta sen jälkeen.

Metallilaminointi tekniikoissa on käytetty molempia menetelmiä, joista yksinkertaisimmassa kappaleen poikkileikkauksien muotoiset metallilevyt liitetään toisiinsa puristamalla esimerkiksi pulttiliitoksilla. Lämpö- ja diffuusioliittämisen avulla saadaan kuitenkin valmistettua paljon kestävämpiä kappaleita. Lämpöliittämisessä on käytetty juottamista ja ultraäänihitsausta. Metallien laminointimenetelmät eivät ole yleistyneet merkittävästi, koska ne vaativat usein paljon jälkikäsitelyä ja prosessien automatisointi on hankalaa. (Gibson *et al*, 2010, s. 219-242.)

3.4 Suorakerrostus/ Directed energy deposition (DED)

Suorakerrostus-menetelmässä materiaalia syötetään sulaan alueeseen, jossa syötetty materiaali ja sulatettu perusaine yhdistyvät. Sula alue siirtyy eteenpäin prosessin aikana ja sulan jäähtyessä, muodostuu palko, joita yhdistämällä päällekkäin tai vierekkäin voidaan lisätä materiaalia kerroksittain sinne, missä sitä tarvitaan. Materiaalin syötössä käytetään joko pulveria tai lankaa ja sulatuksessa käytetään laseria, elektronisuihkua tai valokaarta. Kuvassa 10 on havainnollistettu suorakerrostusmenetelmän toimintaperiaatetta.



Kuva 10. Suorakerrostusmenetelmän yleinen toimintaperiaate, materiaalin syöttönä jauhe (Frazier 2014, s.3)

Suorakerrostuksen suurin etu verrattuna muihin menetelmiin on mahdollisuus tulostaa uusia muotoja valmistettavan kappaleen aihioon, siten että aihion geometria voi olla melko monimutkainen. Sen ansiosta voidaan tulostaa kappaleen sellaiset muodot, jotka ovat tulostuksen kannalta hyviä ja muut muodot voidaan valmistaa perinteisillä koneistusmenetelmillä.

Suorakerroksuksella voidaan myös vaihtaa tulostettavaa materiaalia kesken prosessin, jolloin voidaan luoda kappaleelle uusia ominaisuuksia ja tulostaa esimerkiksi kulutusta kestävää materiaalia sinne missä sitä tarvitaan.

Suorakerrostus mahdollistaa myös käytettyjen ja kuluneiden tai vaurioituneiden kappaleiden korjaukset, koska menetelmällä on mahdollista tulostaa valmiin geometrian päälle. Kun halutaan korjata esimerkiksi korroosiosta kärsinyt kappale, voidaan kappaleen korjattavat pinnat koneistaa ensin puhtaiksi ja sen jälkeen tulostaa pinnalle haluttua materiaalia siten, että jätetään koneistusvara kappaleen viimeistelyä varten. Suorakerroksen avulla voidaan korjata kappaleita uudenveroisiksi.

Neljä suorakerrosten etu on menetelmän nopeus, suurempi tuotto ja valmistettavan kappaleen suurempi koko. Suorakerrosten lisääminen tulostaminen on paljon suurempi kuin esimerkiksi jauhepetisulatuksessa. Suurempi tulostusnopeus vaikuttaa kuitenkin tulostustarkkuuteen, mitä enemmän lisäainetta tuotetaan, sitä huonompi on tulostuksen tarkkuus. Suorakerroksuksella voidaan tulostaa myös tarkasti, mutta silloin tulostusnopeus on paljon hitaampi ja lähestyy jauhepetisulatuksen nopeutta. (Chekurov *et al.* 2017, s. 10-12.)

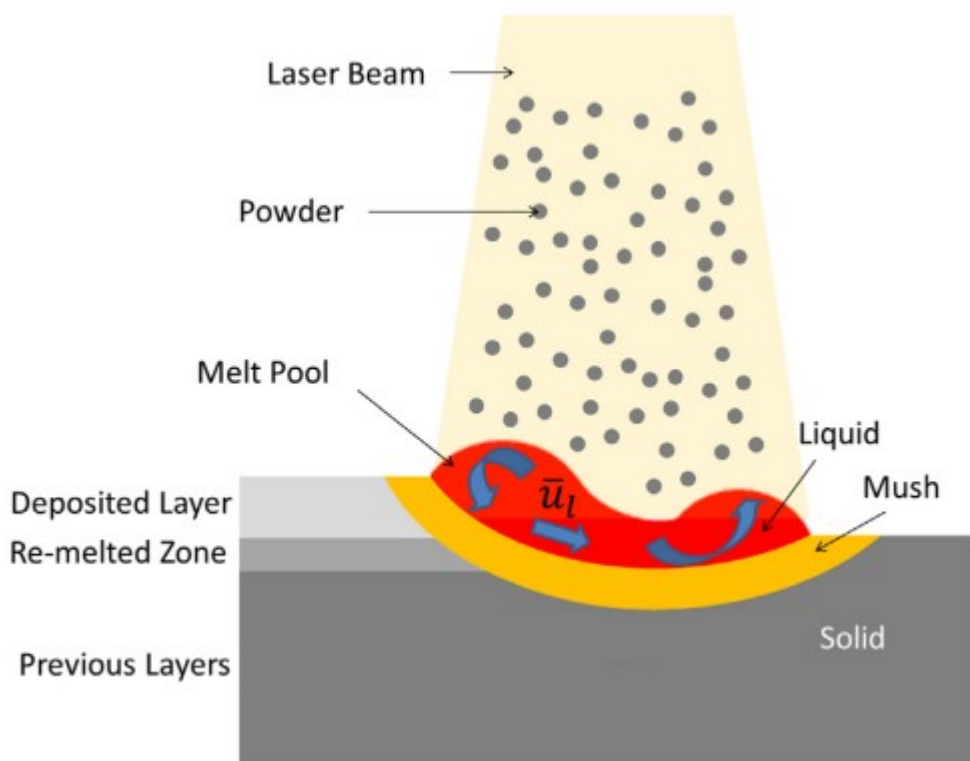
3.5 Suorakerrostuksesta syvemmin

3.5.1 Prosessi

Suorakerrostusprosessissa joko metallijauhetta tai lankaa syötetään laserilla, elektronisuihkulla tai valokaarella sulatettuun alueeseen. Sulan alueen siirtyessä eteenpäin, jäähtyy ja jähmettyy pieni sulatettu alue erittäin nopeasti (10^3 - 10^5 Celsiusta/sekunti) aiheuttaen suuria lämpögradientteja. Riippuen sulatettavasta materiaalista suuri jäähtymisnopeus voi aiheuttaa rakenteellisia ominaisuuksia hiukkastasolla, joita ei tavanomaisilla menetelmillä voida saavuttaa, siten että tulostetun kappaleen laatu on tasaisempi ja parempi kuin esimerkiksi valuissa. Elektronisuihkumenetelmän alhaisemman jäähtymisnopeuden vaikutuksesta kappaleen raerakenne (grain structure) muistuttaa valujen rakennetta. (Gibson *et al.* 2010 s. 245-249.)

Tulostettu kerros koostuu useista peräkkäisistä sulatetuista palkoista, jotka limittyvät toisiinsa, yleensä noin 25% palkon leveydestä on limittynyt. Eli tulostettu materiaali sulaa uudelleen palkojen limittyessä. Yleensä kerroksen paksuus on 0.25-0.5mm, joka kerroksen jälkeen tulostustyökalu siirtyy kerroksen paksuuden verran kauemmaksi kappaleesta. Prosessin aikana voidaan liikuttaa joko tulostustyökalua, työstettävää kappaletta tai molempia samanaikaisesti. Suorakerrostusprosesseissa on käytössä kontrollointityökaluja, joiden avulla voidaan säätää tulostuksen parametreja, kuten pulverinsyöttömäärää, tulostusnopeutta ja laserin tehoa, joiden avulla saadaan ylläpidettyä tulostuksen tasoa. (Gibson

et al. 2010 s. 245-249.) Kuvalla 11 havainnollistetaan sulan alueen kokoa, ominaisuuksia ja lämmölle altistunutta aluetta (HAZ) suorakerrostusprosessissa.



Kuva 11. Lämmölle altistunut alue (HAZ) ja sulan alueen koko lasersuorakerrostuksessa (Thompson et al. 2015, s.44)

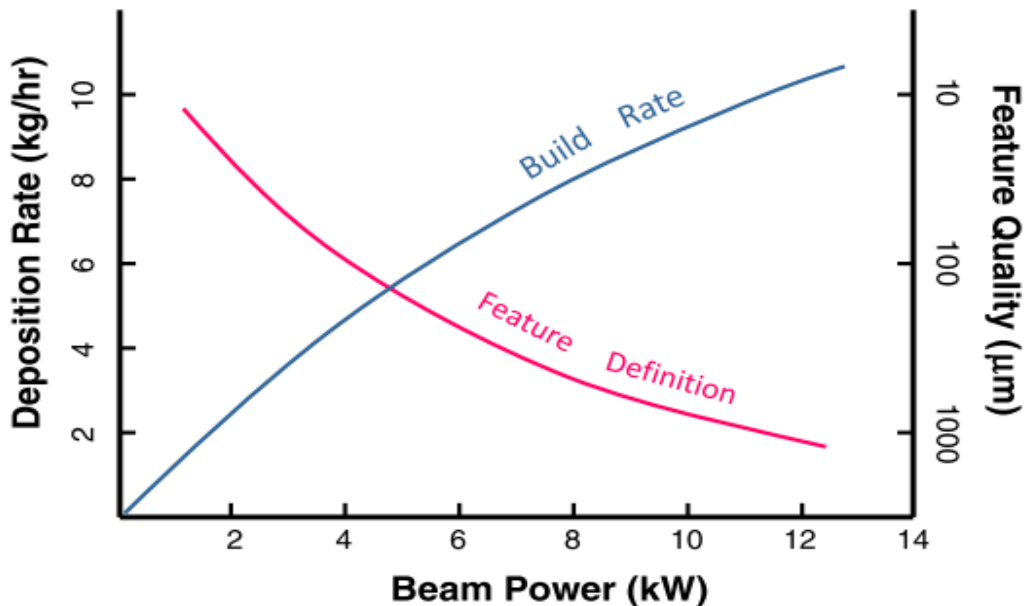
Lasersuorakerrostuksessa (DLD direct laser deposition) on monia lämpöön ja sulaan alueeseen liittyviä ilmiöitä, joita täytyy kontrolloida, jotta voidaan optimoida suorakerrostusprosessia ja valmistaa korkealaatuisia tuotteita. Kontrolloitavia ilmiöitä ovat esimerkiksi jauheen sulaminen, sulan lämpötila, jähmettyminen, mekaniikka ja kyky kiinnittyä kiinteään pintaan (wetting). Lisäksi täytyy kontrolloida lämmön siirtymistä prosessin aikana, jotta voidaan ymmärtää ja optimoida suorakerrostusprosessia ja sen laaduntuottoa. Suorakerrostusprosessin ymmärtäminen ja optimointi vaatii lämpöön ja sulaan alueeseen liittyvien ilmiöiden hallintaa.

Lämpöön liittyvien ilmiöiden kontrolloinnilla voidaan varmistaa tuotteiden sarjatuotanto ja laatu. Sulan alueen lämpöominaisuuksien ja lämmön jakaantumisen seuraamisella (closed loop) ja algoritmeilla voidaan valmistaa kappaleita halutuilla ominaisuuksilla ja toiminnallisuudella. Myös jäännösjännityksiä voidaan kontrolloida suorakerrostuksen aikaisella lämmön seurannalla. Suorakerrostusprosessin lämmön seurannan avulla voidaan kontrolloida eri tulostusparametreja, kuten syötettävää materiaalin määrää, tulostuspään nopeutta, lasersäteen kuviota, lasertehoa, -säteen halkaisijaa, tulostuspalkojen väliä ja kerrosten välistä jäähtymisaikaa, jotta materiaali yhdistyy tehokkaasti prosessin aikana.

Tulostuspään nopeus on yleensä 1- 20 mm/s, laserteho 100-5000 W. Jauheen partikkeli-jakauma vaihtelee riippuen valmistusprosessista, mutta yleensä se on suorakerrostuksessa 10-100 μm . Suorakerrostuksessa partikkelijakauma on suurempi kuin jauhepetimenetelmissä. Jauheen syöttönopeus tyypillisesti vaihtelee 1-10g/min välillä.

Materiaalia lisäävän valmistuksen seuranta on yleensä manuaalista (open loop), mutta prosessin suoran seurannan (closed loop) avulla voidaan varmistaa valmistettavan kappaleen laatu ja prosessin laaduntuottokyky. Esimerkiksi infrapunalämpökameran (pyrometrin) avulla voidaan mitata kappaleen paikallisia kuumia alueita, jotta voidaan hallita esimerkiksi kappaleeseen syntyviä jäännösjännityksiä. Prosessin suoran seurannan avulla voidaan säätää suorakerrostusprosessin parametreja tulostuksen aikana automaattisesti, jolloin prosessin hallinta helpottuu huomattavasti. (Thompson *et al.* 2015, s. 38-39.)

Suorakerrostuksella voidaan valmistaa suuria kappaleita, sillä tulostusalueetta rajoittaa vain tulostustyökalua käyttävän robotin työalue. Suorakerrostuksella voidaan valmistaa myös tarkasti ($\geq 0,1 \text{ mm}$), mutta tarkka tulostus on hidasta ($3 \text{ mm}^3/\text{s}$) pienen tulostusalan ja tulostusvauhdin takia. Nopea tulostus ($10 \text{ mm}^3/\text{s}$) on epätarkempaa ja pinnanlaadultaan huonompaa, tätä havainnollistetaan kuvassa 12. Optimaalisen tulostustason saavuttamiseksi pitää tehdä kompromisseja tulostusnopeudessa, -tarkkuudessa ja mikrorakenneissa. (Gibson *et al.* 2010, S. 266; Chekurov *et al.* 2017, s. 13.)



Kuva 12. Tulostustehon, -nopeuden ja -tarkkuuden suhde. (Frazier 2014, s.8)

Tulostusprosessin kerrosten välissä voidaan kappaleen antaa jäähtyä jonkin aikaa, jotta kappaleen lämpenemisestä aiheutuvia vaikutuksia suorakerrostukseen saadaan vähennettyä. Joissain tapauksissa liian lyhyt jäähtymisaika (idle time) voi aiheuttaa aiempien kerrosten liiallisen sulamisen ja kappaleen vääntymisen. (Thompson *et al.* 2015, s. 54.)

3.5.2 Menetelmät

Suorakerrostuksessa käytetään kolmea eri menetelmää, joissa energianlähteenä on joko laser, elektronisuihku tai valokaari.

3.5.3 Laser

Suosituin menetelmä on laseria energianlähteenä ja materiaalina metallijauhetta käyttävä menetelmä (Wohlers 2014, s. 37.). Laseria käyttävissä menetelmissä voidaan materiaalina käyttää myös lankaa ja pinnoituksissa nauhaa (Tuominen 2016)

Laserin muodostama polttopiste, jossa energiatiheys on riittävä, muodostuu kappaleen pintaan, jos polttopiste on liian syvällä kappaleen pinnasta tai liian ylhäällä tai irti kappaleen pinnasta sulaa aluetta ei synny. Siten muodostunut pinta on tasainen.

Sulan alueen muoto riippuu tulostusnopeudesta, polttopisteen sijainnista, laserin tehosta, pulverin syöttönopeudesta ja kappaleen pinnan muodosta. Kerroksen paksuus muuttuu tulostuksen edetessä, ensimmäiset kerrokset ovat paksumpia tai ohuempia, mutta useiden tulostettujen kerrosten jälkeen kerrospaksuus vakiintuu määritetylle tasolle.

Jos asetuksissa on vikaa, epäonnistuu kerrosten muodostaminen, koska ei ole mahdollista saavuttaa vaadittavaa energiatiheyttä, eli polttopiste muodostuu liian syvälle kappaleen pintaan tai liian paljon irti kappaleen pinnasta. Ensimmäisen kerroksen muodostuksessa polttopiste on yleensä noin 1 mm pinnan alapuolella, jolloin tulostusalusta(kappale) sulaa ja yhdistyy sulaan alueeseen yhdessä syötetyn metallijauheen kanssa. Polttopisteen sijaintia muuttamalla saadaan säädettyä materiaalien sekoittumista keskenään, mitä lähempänä polttopiste on alustan/kappaleen pintaa sitä vähemmän materiaalit sekoittuvat keskenään. (Gibson *et al.* 2010, s. 249-251.)

Optomecin kaupallistama LENS-menetelmä on yksi ensimmäisistä kaupallisista laseria käyttävistä suorakerrostus menetelmistä. LENS-menetelmä vaatii suljetun reagoimattoman kaasukammion, jossa prosessi tapahtuu. (Gibson *et al.* 2010 s. 252-256.) LENS-menetelmä on tällä hetkellä kaupallisesti menestynein DLD menetelmä, muita laseria käyttäviä menetelmiä ovat esimerkiksi laser cladding, direct metal deposition (DMD), laser metal deposition shaping (LMDS) (Thompson *et al.* 2015, s. 41.).

POM Group/ DM3D Technology valmistaa 5-akselisia suorakerrostuslaitteita keskeisellä (coaxial) pulverisyyttömenetelmällä, jossa pulveria syötetään suojakaasun avulla. Laitteissa on integroituna suljettu-silmukka (closed loop) kontrollointi, jonka avulla laite säättää parametreja, kuten pulverinsyöttömäärä, tulostusvauhtia ja laserin tehoa, joiden avulla ylläpidetään tulostuksen tasoa. Suljettu-silmukka kontrollointi on osoittautunut tehokkaaksi tavaksi ylläpitää tulostuksen laatua, myös muut kuin laseria käyttävät suorakerrostus laitevalmistajat kuin Optomec ja DM3D Technology tarjoavat kontrollointityökaluja.

DM3D Technology:n laitteet käyttävät hiilidioksidilasereita, jotka ovat taloudellisia ja tehokkaita, mutta se ei sovellu suurimmalle osalle materiaaleista pitkän aallonpituutensa ja huonon absorption takia ja siksi se aiheuttaa suuremman lämpömäärän ja isomman alueen, johon lämpö kohdistuu. Siksi suurin osa suorakerrostuslaitevalmistajista käyttää kuitu-, diodi- tai Nd-YAG- lasereita. (Gibson *et al.* 2010 S.252-256.)

Suurin osa DLD laitevalmistajista käyttää Nd-YAG- lasereita, joiden teho vaihtelee 1-5 kW välillä. Nd-YAG- lasereita on käytetty onnistuneesti monissa laserhitsaus ja -leikkaus prosesseissa, koska sen aallonpituus (1.067 μm) on sopiva suurimmalle osalle metalleista. Kuitenkin kaikki laserit, jotka ovat tarpeeksi tehokkaita metallijauheen sulattamiseen, ovat mahdollisia. Muita lasereita ovat esimerkiksi hiilidioksidilaser ja pulssi-aalto laser (pulsed-wave laser). Hiilidioksidilaser vaatii kuitenkin paljon suuremman tehon (jopa 18 kW) kuin Nd-YAG- laser pidemmän aallonpituutensa takia ja ei ole siksi yhtä energiatehokas. (Thompson *et al.* 2015, s. 41.)

Hybrid Manufacturing Technologies on yritys, joka suunnittelee, rakentaa ja integroi laseria käyttäviä suorakerrostustyökaluja (LBMD) olemassa oleviin CNC-työkalualustoihin. (Gibson *et al.* 2010 s. 252-256.)

Langan käyttö on harvinaisempaa kuin pulverin käyttö, sillä pulveria käyttävät suorakerrostusmenetelmät ovat kehittyneempiä ja pulverimenetelmälle on tarjolla enemmän laitteita kuin lankamenetelmälle (Thompson *et al.* 2015, s. 39.)

3.5.4 Elektronisuihku

Electron Beam Freeform Fabrication on NASA:n kehittämä menetelmä avaruusalusten rakenteiden korjaamiseen ja valmistamiseen. Elektronisuihkun avulla voidaan valmistaa tuotteita nopeasti ja tarkasti. Menetelmällä voidaan kohdistaa energiaa tehokkaammin kuin lasereilla, mutta toimiakseen menetelmä vaatii tyhjiön. Elektronisuihkumenetelmissä käytetään materiaalin syöttönä lankaa. Sciaky valmistaa suuria EBMD-laitteita, joissa materiaalin syöttö on toteutettu lankamenetelmällä ja prosessi tapahtuu tyhjiökammiossa. (Gibson *et al.* 2010, s. 256.)

Elektronisuihkumenetelmä on tehokkaampi kuin lasermenetelmät. Menetelmä soveltuu hyvin etenkin sellaisten toiminnallisten kappaleiden valmistamiseen ja korjaamiseen,

jotka ovat valmistettu materiaalista joka reagoi herkästi hapen kanssa, koska prosessi tapahtuu tyhjiössä. (Thompson *et al.* 2015, s. 42.)

3.5.5 Valokaari

Useat tutkimusryhmät ovat tutkineet hitsausta ja plasma-menetelmiä suorakerrostus-sovelluksissa. Southern Methodist University, USA, on käyttänyt kaasua kaari hitsausta ja 4- $\frac{1}{2}$ - akselista jysintää kolmiulotteisten kappaleiden valmistukseen. Korea Institute of Science and Technology on käyttänyt hiilidioksidihitsausta ja 5-akselista jysintää kappaleiden valmistukseen. (Gibson *et al.* 2010, s. 257.)

Cranfield University, UK, on kehittänyt Wire+Arc additive manufacture (WAAM) teknologiaa, joka tuottaa nopeasti isoja titaaniseosia lentoteollisuudelle. WAAM-teknologiassa on käytetty energianlähteinä Energialähteinä TIG ja MIG hitsausta, plasmaa, laseria, CMT:tä (cold metal transfer) WAAM systeemi voidaan integroida olemassa olevaan robotti- tai CNC- laitteistoon (Wohlers 2014, s. 99.)

Hitsausmenetelmät ovat käyttökelpoisia ja halvempia kuin laser ja elektronisuihku-menetelmät, mutta suurempi alue, johon lämpö kohdistuu ja prosessin kontrollointiongelmien ovat estäneet menetelmän laajaa kaupallistamista. (Gibson *et al.* 2010, s. 257.)

Energianlähteenä voi olla myös plasma, kuten Plasma deposition manufacturing (PDM) menetelmässä (Thompson *et al.* 2015, s. 42.). PDM menetelmässä materiaalin syöttönä käytetään yleensä metallijauhetta ja kyseisessä menetelmässä materiaalin ja energiankäytön hyötysuhteet ovat korkeita ja laitteet ja valmistuskustannukset alhaisia. PDM menetelmä vaatii kuitenkin koneistusta, koska menetelmän tarkkuus ei ole tarpeeksi hyvä. PDM menetelmä koostuu viidestä osasta plasmaenergian lähteestä, jauheensyöttöyksiköstä, kontrollointilaitteistosta, plasmapolttimesta ja jäähdytyslaitteistosta. (Xinhong, X. *et al.* 2010, s. 291-292.)

3.5.6 Materiaalit

Suorakerrostusmenetelmällä pystytään valmistamaan täysin tiheitä kappaleita, materiaaleista ja materiaaliseoksista, jotka ovat vakaassa tilassa niitä sulatettaessa. Yleisesti metallit, jotka heijastavat ja johtavat lämpöä hyvin, ovat vaikeita tulostettavia, tällaisia ovat esimerkiksi kulta, jotkin alumiiniseokset ja kupari. Muut materiaalit ovat yleisesti melko vaivattomia tulostettavia, kunhan ympäristön ominaisuudet ovat oikeat. Nyrkkisääntönä voidaan pitää että materiaalit, joita voidaan hitsata, voidaan myös tulostaa. (Gibson *et al.* 2010, s.258-261.)

Suorakerrostusmenetelmillä pystytään tyypillisesti tulostamaan seuraavia materiaaleja: (Wohlers 2014, s. 52)

- Työkalu teräkset
- Ruostumattomat teräkset
- Alumiini seokset
- Nikkeli seokset
- Kupari seokset
- Kulta
- Hopea
- Puhdas titaani
- Koboltti-kromi seokset

Useimmissa suorakerrostusmenetelmissä on mahdollista tulostaa useita materiaaleja samanaikaisesti. Suorakerrostusmenetelmällä valmistetut kappaleet ovat lähes 100% tiheitä ja ovat ominaisuuksiltaan vähintään valetun kappaleen tasoa ja joillain menetelmillä ominaisuudet ovat lähes taotun kappaleen tasolla.

Pulverimateriaalien hinnat ovat kalliita verrattuna perinteisen valmistuksen materiaaleihin, työkaluteräs, ruostumaton teräs ja alumiiniseokset maksavat 78-120 \$/kg Koboltti-kromi seokset maksavat 120-545 \$/kg, Nikkeliseokset 210-275 \$/kg, Puhdas titaani ja titaaniseokset 340- 880 \$/kg

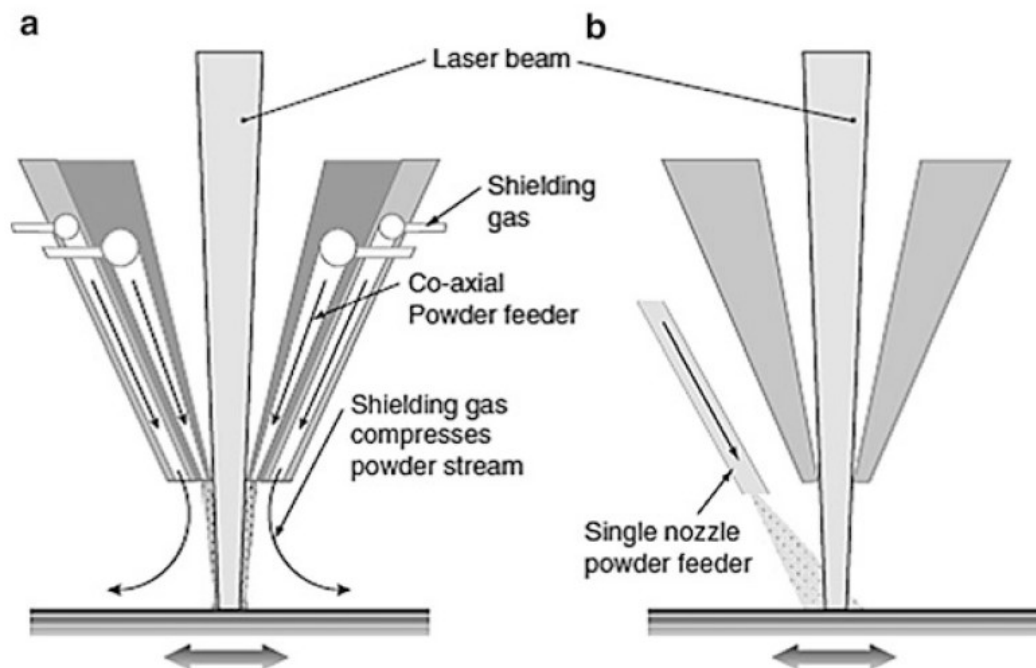
Suorakerrostus menetelmillä on mahdollisuus tulostaa myös täysin uusia metalleja ja seoksia, vaihtamalla ja sekoittamalla eri materiaaleja tulostuksen aikana. (Wohlers 2014, s. 51-55.) Ääritapauksissa on mahdollista valmistaa myös muistimetallisia rakenteita (Chekurov *et al.* 2017, s. 11.).

3.5.7 Metallijauheen syöttö

Metallijauhe on monipuolisin suorakerrostusmenetelmällä syötettävä materiaali ja monia eri metallimateriaaleja on helposti saatavana jauheena. Kaikki prosessissa syötetty metallijauhe ei jää laserilla sulatettuun alueeseen, vaan prosessissa syntyy ylimääräistä jauhetta, jota voidaan uudelleen käyttää, jos jauheen laatu pysyy tarpeeksi hyvänä uudelleenkäyttöä varten. Ylimääräinen jauhe ei kuitenkaan haittaa prosessia, vaan mahdollistaa sulan alueen dynaamisen muutoksen.

Tulostus suuntaa voidaan helposti muuttaa jauhemenetelmällä, koska "ylimääräinen" syötetty jauhe mahdollistaa sulan alueen dynaamisen muutoksen, jolloin tulostettujen painojen väliset pohjat ja syvänteet saadaan täytettyä siten, että tulostetun kerroksen paksuus ei kuitenkaan kasva, tämä ei ole helppoa lankamenetelmällä. Jauhetta syötetään säiliöstä kaasun tai värähtelyn avulla putkia pitkin tulostuspäälle. Tulostuspää syöttää jauhetta polttopisteeseen joko yhdellä tai neljällä suuttimella tai saman keskeisesti.

Samakeskeisessä (coaxial) syötössä pulveria syötetään suojakaasun avulla pieneen pisteeseen, jolloin kaikki syötetty pulveri sulaa tehokkaasti ja suojakaasu estää hapen pääsyn polttoalueeseen. Yhden suuttimen syötössä metallijauhetta syötetään suoraan polttoalueeseen, tämä menetelmä on yksinkertaisin ja halvin ja mahdollistaa pulverin syötön ah-
taisiin paikkoihin, mutta sulan alueen geometria muuttuu tulostussuunnan muuttuessa. Näitä syöttömenetelmiä havainnollistetaan kuvassa 13.



Kuva 13. Samakeskeinen pulverin syöttö (a) ja yhden suuttimen syöttö (b) (Gibson *et al.* 2010, s.252)

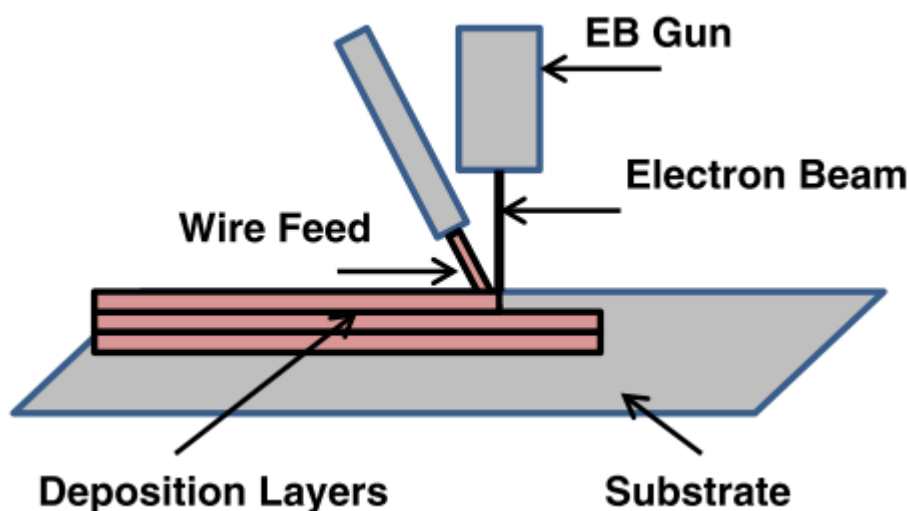
Neljän suuttimen menetelmässä jauhetta syötetään neljällä eri suuttimella 90 asteen kulmissa. Tällä menetelmällä saadaan tasaisesti tulostettua monimutkaisia ja haasteellisia 3D-geometrioita, joissa on paksuja ja ohuita alueita. (Gibson *et al.* 2010, s.249-251.)

Nykyään DLD menetelmissä voi olla käytössä neljä tai enemmän jauhesuuttimia ja jalo-
kaasua (inert gas), jotta saadaan minimoitua prosessissa oleva happimäärä (Thompson *et al.* 2015, s. 39.)

Jauhetta käyttävissä menetelmissä materiaalikäytön hyötysuhde voi olla melko alhainen, LENS-menetelmällä sen on mitattu olevan vain 0.14. Alhaisen materiaalikäytön hyötysuhteen takia prosessissa syntyy paljon ylimääräistä jauhetta, joka voidaan kierrättää ja osittain uudelleen käyttää. Materiaalikäytön alhainen hyötysuhde lisää valmistuskustannuksia kierrätys- ja puhdistustoimintojen takia. (Thompson *et al.* 2015, s. 43.)

3.5.8 Langan syöttö

Langan syöttö-menetelmällä tulostusnopeus on aina yhtä suuri kuin langan syöttönopeus. Syötetty materiaali käytetään lähes 100 %, poisluettuna pienet roiskeet, jotka syntyvät prosessin aikana. Langan syöttö on tehokas menetelmä yksinkertaisille ja suurille kappaleille, joissa kappaleen seinämän vahvuus on tasainen. Valmistettaessa isoja, monimutkaisia ja tiheitä kappaleita, täytyy geometriasta riippuvat tulostusparametrit, tulostuspalikon leveys, paksuus, langan halkaisija ja syöttönopeus, olla hyvin kontrollissa, jotta haluttu kerros saadaan tulostettua kunnolla. Lanka-menetelmät on suunniteltu siten että pysytään tulostamaan siten, että huokosia ei synny, mutta tarkkuus ei ole kovin hyvä. Jotta voidaan saavuttaa korkea tarkkuus ja tiheys monimutkaisissa geometrioissa, täytyy materiaalia poistaa välillä CNC-koneistamalla. Langan syöttöä käytetään tehokkaasti myös päällystyksissä. (Gibson *et al.* 2010, s. 251-252.) Kuvassa 14 havainnollistetaan langan syöttöä.



Kuva 14. Yleistetty langan syöttömenetelmä (Frazier 2014)

Lankamenetelmät eivät ole yhtä yleisiä kuin jauhemenetelmät, koska lankamenetelmiä on vaikeampi kontrolloida tulostusprosessin aikana kuin jauhemenetelmiä. Lankamenetelmillä ei myöskään voida valmistaa yhtä monimutkaisia ja tarkkoja kappaleita, kuin jauhemenetelmillä. Lankamenetelmät ovat myös pulverimenetelmiä alttiimpia värinälle ja häiriöille ja vaativat parempaa materiaalin syötön kontrollointia kuin jauhemenetelmät. (Thompson *et al.* 2015, s. 42.)

Valinta pulverin ja langan välillä tulee tehdä sen perusteella, minkälaisia geometrioita tulostetaan, kuinka tarkkoja kappaleita pyritään valmistamaan ja yhdistetäänkö materiaalia poistavaa ja lisäävää valmistusta (Gibson *et al.* 2010 s. 245.). Sähkökaarta käytettäessä lankamenetelmä on pulveria merkittävästi halvempi (Tuominen 2016), mutta teknologia on vielä kehitysvaiheessa.

3.5.9 Hyödyt ja haasteet

Suorakerrostuksella voidaan saavuttaa monia hyötyjä verrattuna muihin materiaalia lisääviin menetelmiin ja perinteiseen valmistukseen. Suorakerrostuksella on mahdollista valmistaa täysin tiheitä kappaleita, joiden mikrorakennetta voidaan kontrolloida ja valmistaa ominaisuuksiltaan täysin uudenlaisia kappaleita. Tulostettavaa materiaalia voidaan vaihtaa kesken tulostuksen ja valmistaa täysin uudenlaisia materiaaleja sekoittamalla eri metalleja keskenään. Suorakerrostuksella voidaan suunnitella tulostettava materiaali tarpeen mukaan syöttämällä erillisistä säiliöistä eri materiaaleja eri suuttimilla eri kohtiin kappaletta, prosessin seuraamisella (closed loop) voidaan valmistaa materiaaleja optimaalisilla ominaisuuksilla.

Suorakerrostuksella voidaan tulostaa materiaalia tarkasti juuri sinne missä sitä tarvitaan, siten on mahdollista korjata tehokkaasti sellaisia komponentteja, joiden korjaaminen ei ole ollut ennen mahdollista, esimerkiksi vaurioituneiden turbiinin lapojen korjaaminen onnistuu suorakerrostuksen avulla. Suorakerrostuksella voidaan korjata komponentteja siten, että ne kestävät paremmin kulutusta kuin alkuperäinen komponentti. Myös vetoakseleiden korjaus onnistuu, kuten laakeri-, tiiviste- ja liitäntäpintojen korjaaminen, joiden korjaaminen ei ole aiemmin ollut mahdollista perinteisillä hitsausmenetelmillä.

Suorakerrostuksella voidaan tehdä myös erilaisia pinnoituksia, voidaan esimerkiksi tulostaa kulumista ja korroosiota kestävä materiaalia sinne, missä sitä tarvitaan. Voidaan tehdä tehokkaasti pinnoituksia (cladding) ja kovapinnoituksia (hardfacing) geometrialtaan monimutkaisiin kappaleisiin. Pinnoitukset ovat metallurgisessa sidoksessa, joka on kestävämpi kuin esim. kromauksen mekaaninen sidos. (Gibson *et al.* 2010, s. 266; Gu, D. 2015, s. 23-30.)

Suorakerrostuksella voidaan lisätä muotoja olemassa olevaan kappaleeseen, silloin voidaan esimerkiksi nopeuttaa sellaisten kappaleiden tuotantoa, joissa muuten tarvittaisiin paljon materiaalia poistavaa valmistusta taotusta aihioista (Gibson *et al.* 2010, s. 266.). Tulostusalustan geometrialla ei ole vaikutusta tulostuksen onnistumiseen, se mahdollistaa vain niiden muotojen tulostamisen, jotka kannattaa tehdä materiaalia lisäämällä. Muut muodot voidaan tehdä perinteisiä koneistusmenetelmiä käyttäen. Sorvattuun kappaleeseen voidaan esimerkiksi tulostaa olakkeet, joiden avulla alkuperäisen aihion kokoa ja materiaalia poistavaa valmistusta saadaan vähennettyä ja koneistusaikaa pienennettyä. (Chekurov *et al.* 2017, s.11-12.)

Verrattuna muihin menetelmiin suorakerrostuksella voidaan tulostaa kooltaan suurempia kappaleita nopeammin, laserteho on suurempi ja ulottuvuus rajoittuu vain tulostuspäätä käyttävän robotin ulottuvuuteen. Nopea tulostus on kuitenkin epätarkempaa, on mahdollista tulostaa myös tarkempia piirteitä, mutta silloin tulostusnopeus laskee. (Chekurov *et al.* 2017, s.11-12.)

Suorakerrostus menetelmien tarkkuus riippuu tulostusnopeudesta, jos halutaan tulostaa kappaleita nopeasti, kärsii tulostuksen tarkkuus. Tarkka tulostus on hidasta pienen tulostusalan ja tulostusvauhdin takia. Nopeampi tulostus on epätarkempaa ja pinnanlaadultaan huonompaa. Optimaalisen tulostustason saavuttamiseksi pitää tehdä kompromisseja tulostusnopeudessa, -tarkkuudessa ja mikrorakenteessa. Tarkallakaan tulostuksella ei voida valmistaa yhtä monimutkaisia rakenteita kuin jauhepetimenetelmällä.

Suorakerrostusprosessilla valmistetut kappaleet vaativat jälkikäsittelyä, kuten koneistusta huonon pinnanlaadun ja tarkkuuden parantamiseksi ja tukirakenteiden poistamiseksi, sekä lämpökäsittelyn jäännösjännitysten poistamiseksi. (Gibson *et al.* 2010, s. 266.)

DLD prosessia on melko hankala mallintaa ja kontrolloida, koska prosessissa on monta muuttujaa, joita ovat esimerkiksi materiaalin tiheys, lämmönjohtavuus, lasersäteen halkaisija, laserteho, tulostusvauhti, jauheen syöttönopeus ja jauheen koko (Thompson *et al.* 2015, s. 42.) DLD prosessin monitorointi on kehittymässä prosessin aikaiseen seurantaan ja kontrollointiin, DLD-prosessin monitorointi ei ole kuitenkaan niin yleistä kuin muissa perinteisissä lasertyöstön menetelmissä. DLD prosessin monitorointi on kuitenkin kehittyneempää kuin jauhepetisulatusprosesseissa esim. SLM:ssä.

DLD prosessin parametrien määrittämisessä on haasteita, jotta voidaan valmistaa oikean muotoisia (near net-shape) ja täysin tiheitä kappaleita. Optimaaliset parametrit vaihtelevat laitteesta riippuen. Ideaalitapauksessa oikeat parametrit tiedettäisiin ennen tulostuksen aloittamista, mutta todellisuudessa oikeiden parametrien löytäminen vaatii yritystä ja erehdystä. Lisäksi ohjelmistoissa on rajoituksia DLD prosessin aikaisten ilmiöiden tarkassa mallintamisessa numeerisesti.

DLD-menetelmän tehokkuus on yksi haaste, sillä prosessissa on huomattava määrä hukkaa sekä energiankäytössä että jauheenkäytön tehokkuudessa, tulevaisuudessa kannattaa tutkia, miten prosessin kokonaistehokkuutta saataisiin parannettua.

Prosessin aikana tapahtuvia monimutkaisia kappaleen säteilyominaisuuksia täytyy tutkia enemmän, jotta prosessia saadaan hallittua paremmin. Siksi heijastavien metallien valmistus, kuten kupari ja alumiini, on vielä hankalaa. Heijastavien materiaalien DLD tulostaminen vaatii muutoksia prosessiin, esimerkiksi erilaisia lasereita.

Prosessien, joissa syötetään useita eri materiaaleja, monitorointi on vielä haastavampaa kuin yhden materiaalin prosessissa. Yhden materiaalin prosessin monitorointi ja käytännöt tulee olla kunnossa ennen kuin pystytään valmistamaan toiminnallisia uusia materiaaleja.

DLD prosessilla ei vielä pystytä valmistamaan täysin valmista tuotetta, vaan kappaleet täytyy koneistaa prosessin jälkeen. Hybridi menetelmät, joissa yhdistetään ainetta poistavaa ja lisäävää valmistusta voivat tuottaa suoraan valmiita kappaleita. Koneistuksen jälkeen kappaleet vaativat lämpökäsittelyn jäännösjännitysten poistamiseksi.

Standardien ja säännösten puuttuminen hidastaa suorakerrostusmenetelmien yleistymistä, ASTM international on kuitenkin aloittanut materiaalia lisäävällä valmistettujen kappaleiden sertifiointin.

Menetelmän laajempi käyttöönotto teollisuudessa vaatii prosessin joustavampaa toimintaa. Prosessin tulisi toimia varmalla tasolla ja prosessin toistettavuus tulisi olla hyvä riippumatta tuotantomääristä. Myös osaava työvoima laitteiden asetusten tekoa ja prosessin seurantaan varten tulee kouluttaa.

Paljon tutkimushankkeita on kuitenkin käynnissä haasteiden ratkaisemiseksi ja kappaleen lämpöhistorian ja tulostusprosessin jälkeisten kappaleen ominaisuuksien yhdistämiseksi. (Thompson *et al.* 2015, s. 57-59.)

3.5.10 Jälkikäsittely

Suorakerrostus vaatii yleensä jälkikäsittelyä, riippuen menetelmästä, tarkkuudesta ja kappaleelta vaadittavilta ominaisuuksista jälkikäsittely voi sisältää tukirakenteiden poistamista, pinnanlaadun ja tarkkuuden parantamista, esteettisiä parannuksia ja kappaleen ominaisuuksien parantamista lämpökäsittelyn avulla. (Gibson *et al.* 2010, s. 329-349.)

Koneistuksella saadaan poistettua mahdollisia tukirakenteita ja parannettua kappaleen pinnanlaatua ja tarkkuutta sekä esteettisyyttä. Kappaletta suunniteltaessa pitää huomioida kappaleen toiminnalliset pinnat siten, että niissä on materiaalia enemmän, jotta on varaa koneistaa toiminnalliset pinnat oikeaan tarkkuuteen. Tukirakenteet kannattaa myös suunnitella siten, että joko ne ovat osa valmistettavaa kappaletta, tai niiden poistaminen on helppoa koneistamalla. Sisäisten kanavien koneistuksessa voidaan käyttää AFM-menetelmää (abrasive machining flow), jossa hiovaa ainetta syötetään paineella kanavaan, siten että aine hioo kanavan pintoja osuessaan niihin.

Koneistuksen jälkeen kappale yleensä puhdistetaan ja ylimääräinen metallijauhe voidaan osittain uudelleen käyttää. Kappaleessa kiinni oleva ylimääräinen jauhe sulaa kiinni kappaleeseen lämpökäsittelyssä, jos sitä ei ole puhdistettu kappaleesta. Ylimääräinen jauhe voi siis heikentää kappaleen pinnanlaatua ja mahdollisesti tukkia kappaleen sisäisiä kanavia. Puhdistuksessa voidaan käyttää paineilmaa tai ultraäänilaitteita, riippuen kappaleen geometriasta, puhdistus voidaan tehdä myös käsin esim. harjan avulla.

Kappaleen puhdistuksen jälkeen kappale yleensä lämpökäsitellään, jotta tulostuksessa aiheutuneet kappaleen sisäiset jännitykset saadaan poistettua ja kappaleen mekaanisia ominaisuuksia saadaan parannettua. Kappaleelle tehtävä lämpökäsittely riippuu monesta eri tekijästä, kuten kappaleen materiaalista, koosta, geometrisista ominaisuuksista, vaadittavista mekaanisista ominaisuuksista ja käytetystä tulostusmenetelmästä. Lämpökäsittely voi sisältää esimerkiksi jännityksen poiston, hippauksen (HIP hot isostatic pressing),

jonka avulla saadaan eliminoidua mahdolliset huokoisuudet ja halkeamat, hiiletyskarkaisu, jonka avulla saadaan kappaleelle halutut materiaali- ja kovuusominaisuudet.

Lämpökäsittelyn jälkeen viimeisenä jälkikäsittelyn vaiheena on tarkistus. Kappaleen kestävyys ja tarkkuuden tarkistamisessa voidaan käyttää paljon erilaisia menetelmiä. Kappaleen tarkkuuden mittauksessa voidaan käyttää perinteisiä mittavälineitä tai tarkempia menetelmiä kuten koordinaattimittausta (CMM) ja laserskannaus. Kappaleen pinnan virheiden ja epätasaisuuden tarkistuksessa voi käyttää FPI-menetelmää (fluorescent penetrant inspection). Muita tarkistusmenetelmiä ovat röntgentarkistus, ja CT-skannaus, joita on käytetty sisäisten halkeamien ja ylimääräisen pulverin havaitsemiseksi. (Wohlers 2014, s.42-47.)

3.5.11 Konevalmistajat

Optomec (New Mexico, USA) tarjoaa suorakerrostusmenetelmän, Laser-engineered net shaping (LENS). LENS-menetelmällä voidaan korjata ja valmistaa metallikappaleita. LENS-menetelmässä syötetään metallijauhetta sulaan alueeseen, joka on sulatettu keskittetyllä lasersäteellä. LENS-menetelmällä on mahdollista valmistaa kappaleita, jotka ovat materiaaliominaisuuksiltaan parempia kuin perinteisillä menetelmillä valmistetut kappaleet.

BeAM (Illkirch, France) julkaisi suorakerrostusmenetelmä EasyCLAD Systemsin vuonna 2009. EasyCLAD Systemsillä on mahdollista valmistaa ja korjata metallikappaleita. Mobile CLAD on pienin kone, jonka hinta on 340 000- 650 000 euroa. The CLAD Unit on hieman isompi ja sen hinta on 850 000- 1.3 miljoonaa euroa. Magic LF 6000 on suurin kone ja sen hinta on 1.4 miljoonaa euroa

InssTek(Daejeon, Eteläkorea) tarjoaa suorakerrostusmenetelmiä, joissa vaihtoehtoina 3- akselinen ja 5-akselinen ohjaus ja monia pulverin syöttö menetelmiä. Menetelmänä on laser-suorakerrostus, direct metal tooling (DMT). Tarjolla on kaksi menetelmää MX-3 ja MX-4, joilla molemmilla voidaan tehdä metallikappaleiden valmistusta ja korjauksia. InssTek tarjoaa myös modifioituja ja kustomoituja ratkaisuja asiakkaan tarpeisiin. Suorakerrostusmenetelmissä voidaan käyttää materiaaleina ruostumatonta terästä, työkaluterästä, titaaniseoksia, sekä nikkeli- ja koboltti- superseoksia.

Sciaky (Chicago, USA) alkoi 2009 myymään valmistuspalveluja ja koneita suorakerrostus-menetelmää, Electron Beam Direct Manufacturing (EBDM), hyväksikäyttäen. Sciaky suunnittelee ja rakentaa kustomoituja EBDM-systeemejä asiakkaan yksilöllisiin menetelmiin ja kappaleen koon vaatimuksiin. Menetelmä eroaa kahdella tavalla muista suorakerrostusmenetelmistä, sillä se käyttää elektronisuihkua energialähteenä ja syöttää lankaa pulverin sijaan, lisäksi menetelmä vaatii tyhjiön. Menetelmä tulostaa materiaalia nopeasti (3.2-9.1 kg/h) ja tulostetun "pisaran" poikkileikkaus on 3.2 x 12,7 mm. Menetelmällä voidaan valmistaa kappaleita, joiden suurin mahdollinen koko on 6.3x1.4x1.5 metriä,

valmistetun kappaleen pinta on karkea ja epätasainen, joten se vaatii viimeistelykoneistusta suorakerrostuksen jälkeen. Viimeistelykoneistus voi olla jopa hitaampi prosessi kuin suorakerrostus ja CAD-datan prosessointi ja työkalun ratojen laskenta voi viedä päiviä. Menetelmällä voidaan suorakerrostaa titaania, ruostumattomia teräksiä, koboltiseoksia, nikkeliseoksia, kupari-nikkeliseoksia, tantalumia ja alumiinia.

Trumpf (Ditzingen, Saksa) on työkalu- ja laserteknologiavalmistaja, joka tarjoaa suora-kerrostusjärjestelmiä, joiden hinnat vaihtelevat 400 000 – 750 000€. Materiaaleina suora-kerrostusjärjestelmissä on työkaluteräs, ruostumaton teräs, karbidit, alumiiniseokset, titaaniseokset, nikkeliseokset ja kupariseokset. (Wohlers 2014, s. 72-95.)

Hybrid Manufacturing Technologies (HTM) tarjoaa suorakerrostus menetelmää hyödyntävä CNC- koneistuskeskuksen. Koneistuskeskus yhdistää viisi toimintoa: CNC-jyrsinnän, suorakerrostus-menetelmän, mittauksen, hionnan ja lasermerkkauksen. Kohderyhmänä korjaus ja uudelleen työstö arvokkaille metalliosille, kuten turbiinien siipien ja impellerien päille.

Laser Consolidation on suorakerrostusmenetelmä, joka tulostaa tarkasti kappaleita: $\pm 0.05\text{mm}$. pinnankarheus (Ra) on yhden mikrometrin luokkaa. Menetelmän tarkkuuden ja pinnanlaadun takia vain kontaktipinnat tarvitsevat jälkityöstöä.

WAAM (Wire+Arc additive manufacture) on Cranfield University:n (UK) kehittämä suorakerrostusmenetelmä, jonka avulla voidaan valmistaa nopeasti isoja titaaniseososia lentoteollisuudelle. Menetelmän energialähteinä voi olla TIG ja MIG hitsaus, plasma, laser tai CMT(cold metal transfer). WAAM systeemi voidaan integroida olemassa olevaan robotti- tai CNC- laitteistoon.

DMG Mori Seiki on julkaissut vuonna 2013 Lasertec 65:en, joka on hybridilaitte, eli se yhdistää 5-akseli koneistuksen ja suorakerrostusmenetelmän. Laitteessa on työkalunvaihtaja käyttää CNC työkaluja ja jauheensyöttöpäätä, joka sisältää laserin. Laite muodostaa 0,3 mm paksuja kerroksia, jotka 3mm leveitä. Laitteen hinta on noin 800 000€ (Wohlers 2014, s. 91-99.)

Mazak, INTEGREX i-400AM on myös hybridimenetelmä, joka on julkaistu vuonna 2014. Laite on Lasertec 65:een verrattava koneistuskeskus, joka yhdistää 5-akselikoneistuksen ja suorakerrostus-menetelmän Laitteella voidaan valmistaa materiaalia lisäämällä ja viimeistelykoneistamalla pieniä eriä vaikeasti koneistettavista materiaaleista valmistettuja kappaleita esimerkiksi ilmailu-, energia- ja lääketeollisuuteen. Laitteella on myös mahdollista tehdä myös lasermerkintöjä. Laite käyttää metallipulveria, joka sulatetaan kuitulaserilla. Menetelmällä voidaan tulostaa ja yhdistää eri metalleja, josta on hyötyä esimerkiksi kuluneiden ja vaurioituneiden komponenttien, kuten turbiinin lapojen kunnostuksessa. Menetelmässä on käytettävissä kaksi erilaista tulostuspäätä, toinen nopeaan

tulostukseen ja toinen tarkkaan tulostukseen, asiakas valitsee kumman ottaa, riippuen valmistusprosessista ja käytettävästä jauhemateriaalista. (<https://www.mazakusa.com/news-events/press-releases/mazak-introduces-new-hybrid-multi-tasking-technology/>)

4 NYKYTILAKARTOITUS

4.1 Tuotannon nykytila

Ata Gears Oy myy, suunnittelee ja valmistaa kaarevahamapaisia kartiohammaspyöriä ja muita tarkkaa koneistusta vaativia komponentteja vaativiin meriteollisuuden ja teollisuuden käyttökohteisiin.

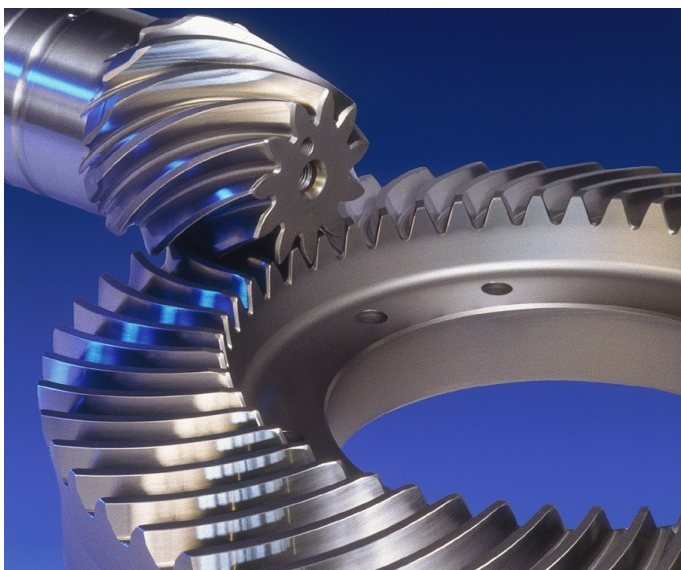
Ata Gears toimii kansainvälisesti tiiviissä yhteistyössä tärkeimpien asiakkaidensa kanssa, edistäen molempien osapuolten menestystä. Yrityksen visiona on olla halutuin ja tehokkain asiantuntija omalla alallaan, sisältäen suunnittelun ja laskentaosaamispalvelut kartiohammaspyöriin liittyen. Yrityksen tuotteista 33% myydään Suomeen, 33% Eurooppaan, 30% Aasiaan ja 4% Yhdysvaltoihin. (ATA Gears yritysesittely, 2017)

Yrityksellä on kolme toimipistettä, joista kaksi on Tampereella, Atalassa ja Hautalassa, joissa tapahtuu suurin osa valmistuksesta. Pälkäneellä on materiaalivarasto, josta oikeaan mittaan sahatut ja koneistetut ahiot lähtevät Tampereen toimipisteisiin seuraavia valmistusvaiheita varten. Yrityksellä on tällä hetkellä 185 työntekijää ja liikevaihto vuonna 2016 oli 26 miljoonaa euroa. (ATA Gears yritysesittely, 2017) (Knuuttila 2015)

4.2 Valmistettavat tuotteet

Yrityksen päätuotteena on kaarevahampaiset kartiohammaspyörät, joista suurin osa tehdään meriteollisuuden potkurijärjestelmiin. Noin 65% tuotteista menee meriteollisuuteen ja 35% muihin teollisuussovelluksiin.

Kaarevahampainen hammaspyöräpari koostuu käyttävästä ja käytettävästä hammaspyörästä, eli pinionista ja lautasesta. Hammaspyöräparin avulla saadaan voimansiirtoakselit risteävään asemaan, eli yleensä kohtisuoraan, toisiinsa nähden. (Hyvönen 2008) Kuvassa 15 on esitetty kaarevahampainen kartiohammaspyöräpari.



Kuva 15. Kaarevahampainen kartiohammaspyöräpari, pinioni ja lautanen (ATA Gears yritysesittely, 2017)

Potkurijärjestelmien lisäksi yritys toimittaa kaarevahampaisia kartiohammaspyöräpareja kaivos- ja voimansiirtojärjestelmiin, raskaisiin ajoneuvoihin ja junavaunuihin sekä vetureihin. (ATA Gears yritysesittely, 2017)

Yritys on alkanut valmistaa myös niin sanottuja uusia tuotteita perinteisen hammaspyörävalmistuksen rinnalle. Näihin uusiin tuotteisiin kuuluu muun muassa impellerit, kaivosteollisuuden tarpeisiin valmistettavat porapäät ja planeettavaihteistojen osat, kuten planeetan kantajat ja kehäpyörät.

4.3 Valmistusprosessi

Kaarevahampaiset kartiohammaspyörät valmistetaan pareina, jotka koostuvat pinionista ja lautasesta. Jokainen pinioni koneistetaan yksilöllisesti sopivaksi lautaselle siten, että hampaan kosketuskuvio vastaa asiakkaan vaatimuksia. Laivateollisuuteen menevien hammaspyörien vaatimukset ovat korkeita suurten kuormitusten ja vaikean huollettavuuden takia.

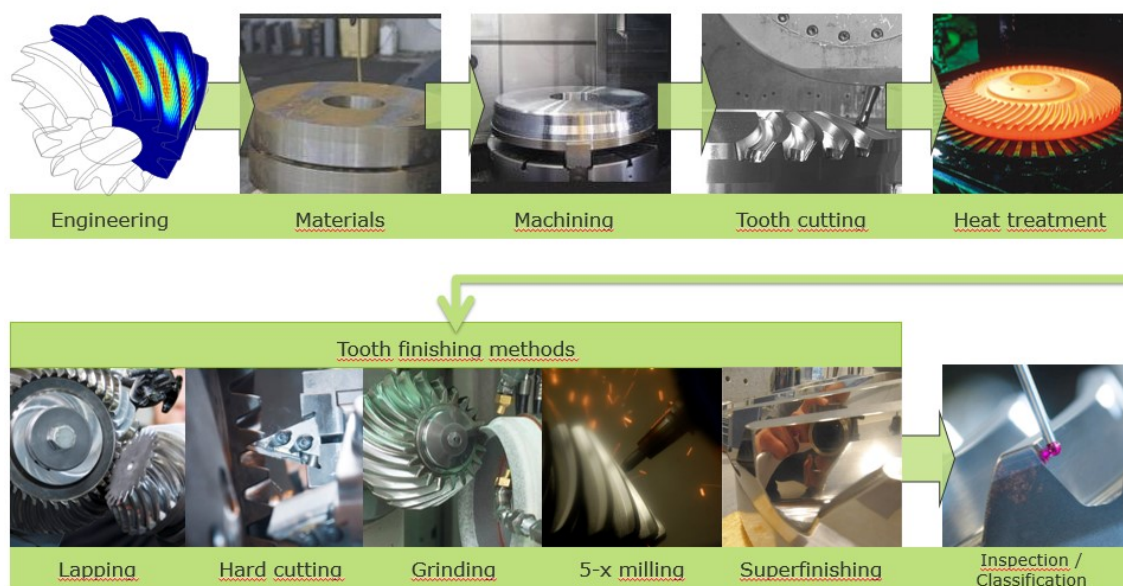
Kaarevahampainen kartiohammaspyöräpari on erittäin oleellinen osa ohjauspotkurijärjestelmää. Hammaspyöräparin tehtävänä on saada voimansiirtoakselit 90 asteen kulmaan toisiinsa nähden. Kaarevahampaisella hammaspyöräparilla saavutetaan korkeampi tehonsiirto ja hiljaisempi käyntiäänä kuin suorahampaisella hammaspyöräparilla. (Väisänen, 2015) Kuvassa 16 on esitetty potkurijärjestelmä, jossa käytetään kaarevahampaista kartiohammaspyöräparia.



Kuva 16. Potkurijärjestelmä. (ATA Gears yritysesittely 2017)

Vaativien käyttöolosuhteiden takia hammaspyörien valmistukselta vaaditaan paljon erikoisosaamista, jotta hammaspyöriltä vaadittavat geometriat, materiaali- ja pinnanlaatuvaatimukset voidaan saavuttaa. Hammaspyörien lämpökäsittely on yksi vaativan tuotannon vaiheista, jonka avulla saadaan hammaspyörille kova kulutusta kestävä pinta, vaadittavalla hiiletys syvyydellä.

Valmistusprosessi sisältää lukuisia työvaiheita, ennen kuin tae-aihoista saadaan valmistettua valmis hammaspyöräpari. Seuraava kuva 17 havainnollistaa tavanomaista kaarevahampaisen kartiohammaspyöräparin valmistusprosessia.



Kuva 17. Kaarevahampaisen kartiohammaspyöräparin valmistusprosessi. (ATA Gears yritysesittely, 2017)

Suunnittelussa suunnitellaan hammaspyörien hampaiden geometria vastaamaan asiakkaan vaatimukseen. Valmistusprosessi alkaa valmiin takeen pehmeäkoneistuksesta, joka sisältää muotosorvauksen ja hampaiden pehmeäkoneistuksen. Pehmeäkoneistusvaiheessa jätetään vielä koneistusvaroja kovakoneistusta varten. Pehmeäkoneistuksen jälkeen tehdään hammaspyörälle lämpökäsittely, jonka avulla saadaan muodostettua hammaspyörälle vaadittavat kovuusominaisuudet ja haluttu hiiletyskerros. Lämpökäsittelyn avulla hampaista saadaan kulutusta ja väsymistä kestävä pinnan puristusjännityksen avulla, siten että hampaan sisus säilyy sitkeänä. Lämpökäsittelyn jälkeen hammaspyörät kovakoneistetaan ja viimeistellään erilaisilla menetelmillä. Kovakoneistuksella saadaan poistettua lämpökäsittelyssä syntyneet vääntymät ja muodonmuutokset. Viimeisenä valmistusprosessissa tehdään asiakkaan haluamat mittaukset ja meriteollisuuteen meneville hammaspyörille ulkopuolisen luokittajat tekemät luokitukset korkean laatutason varmistamiseksi. (Hyvönen 2008)

4.4 Teknologiaselvitys

4.4.1 Materiaalia lisäävän valmistuksen maturiteettitaso

Markkinoiden epävarmuudesta ja kovasta globaalista kilpailusta johtuen yrityksillä on tarve innovoida uusia tuotteita ja investoida uusiin tuotantoteknologioihin jo teknologian varhaisessa kehitysvaiheessa. Uusilla teknologioilla pyritään saavuttamaan parempia tuotteita, uusia toiminnollisuuksia ja lisääntyvää myyntiä, sekä säästöjä tuotannossa.

Materiaalia lisäävä valmistus on hyvä esimerkki tällaisesta tuotantoteknologiasta, sillä se on vielä kehitysvaiheessa, ja sisältää monia epävarmuustekijöitä ja riskejä. Väärä ajoitus tuotantoteknologian käyttöönotossa vaarantaa mahdollisen uuden liiketoiminnan.

Uuden tuotantoteknologian maturiteettitason määrittäminen on kriittinen tekijä yrityksen menestymisen kannalta. Teknologian ennustaminen sisältää tiedonkeruuta teknologiasta ja teknologian kehityksen seuranta. Ennustamisen avulla pyritään välttämään yllätyksiä ja saamaan tietoa päätöksen tekoon eri teknologioiden välillä.

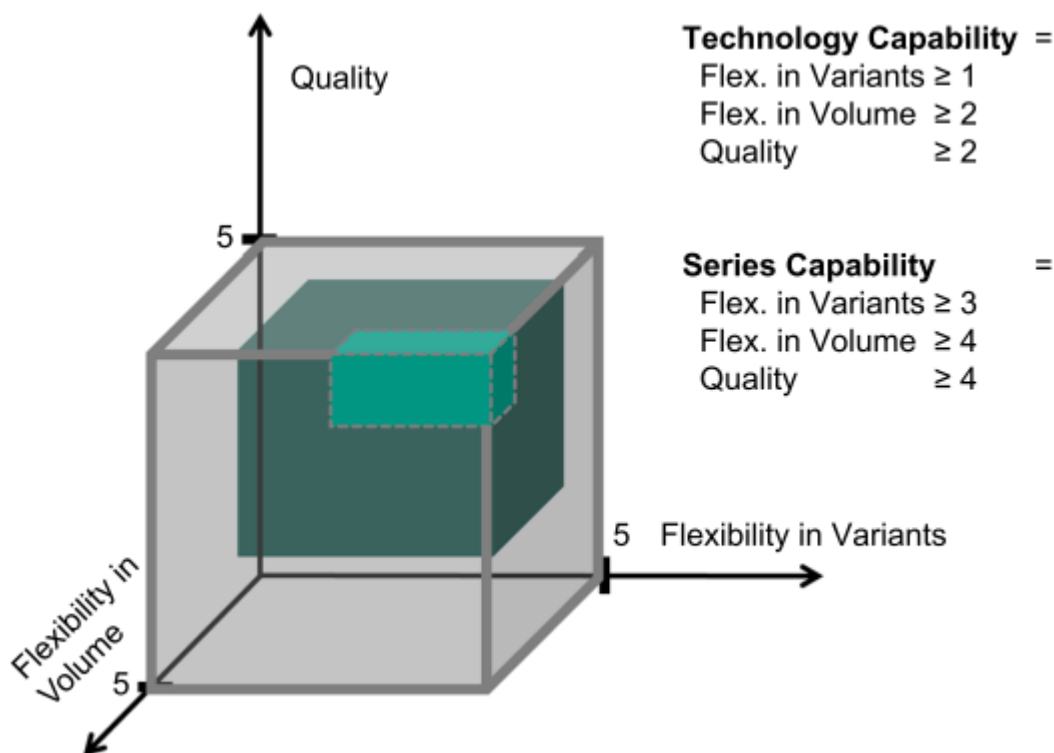
Uuden teknologian maturiteettitason määrittämiseksi on kehitetty erilaisia malleja, joiden pohjana on NASA:n suunnittelema TRL (Technology readiness level) malli. Toinen tunnettu malli on U.S. Department Of Defence:n (DoD) kehittämä MRL (manufacturing readiness level). MRL kuvaa uuden tuotteen valmistettavuutta, eikä niinkään uuden tuotantoteknologian maturiteettia. Rolls-Royce on myös kehittänyt oman mallin, MCRL (Manufacturing capability readiness level), liittyen uusien valmistusmenetelmien maturiteettiin, käyttäen kriteereinä ilmailuteollisuuden vaatimuksia.

Steven Petersin kehittämä malli MTRL (Manufacturing technology readiness level) tuotantoteknologian maturiteettitason määrittämiseksi on rakennettu edellä mainittujen mallien pohjalta ja sitä voidaan käyttää teknologian arviointiin osana strategista päätöksentekoa. Malli vastaa kysymyksiin onko uusi tuotantoteknologia valmis suoriutumaan hyvin sarjatuotannossa ja millä indikaattoreilla valmiutta mitataan. Kuvassa 18 on eritelty yllämainitut mallit tuotantoteknologian maturiteettitason määrittämiseksi.

L	Manufacturing readiness level (MRL) model, US DoD	L	Manufacturing capability readiness level (MCRL) model, Rolls-Royce	L	Manufacturing technology readiness level (MTRL) Model
1	Basic manufacturing implications identified	1	Process concept proposed with scientific foundation	1	Manufacturing principle described
2	Manufacturing concepts identified	2	Applicability and validity of concept described and vetted, or demonstrated	2	Concept of machinery equipment in series production described; general EBIT-potential estimated; interaction with material analyzed
3	Manufacturing proof of concept	3	Experimental proof of concept completed	3	Manufacturing principle tested (in laboratory); impact on product design described
4	Capability to produce the technology in a laboratory	4	Process validated in laboratory using representative development equipment	4	Technology capability proven, material proven
5	Capability to produce prototype components in a relevant environment	5	Basic capability demonstrated using production equipment	5	Concept of plant and production line designed (incl. capacity planning); suppliers identified; EBIT-potential validated
6	Capability to produce a prototype (sub-)system in a relevant environment	6	Process optimized for capability and rate using production equipment	6	Series capability proven
7	Capability to produce systems in a representative production environment	7	Capability and rate confirmed via economic run lengths on production parts	7	Suppliers and materials certified
8	Pilot line capability demonstrated	8	Fully production capable process qualified on all parts over significant run lengths	8	Low rate production demonstrated (pilot run)
9	Low rate production demonstrated	9	Fully production capable process on all parts over extended period (all business case metrics achieved)	9	Start of (series) production (job nr. 1)
10	Full Rate Production demonstrated and lean production practices in place			10	Overall equipment effectiveness (OEE) at comprehensive level (e.g. $\geq 85\%$)

Kuva 18. Eri mallit tuotantoteknologian maturiteettitason määrittelemiseksi (Peters 2015)

Petersin mallilla tarkastellaan tuotantoteknologian kyvykkyyttä ja joustavuuden sekä suorituskyvyn integraatiota muuttuvissa tuotanto-olosuhteissa, eli muuttuvien tuotteiden ja tuotantomäärien vaikutusta. Mallin indikaattoreina ovat tuotantoteknologian tuottama laatu ja joustavuus tuotantomäärissä ja erilaisissa tuotteissa. Kuvassa 19 on esitetty MTRL-mallin indikaattorit.



Kuva 19. MTRL-mallin indikaattorit (Peters 2015)

Yllämainitut indikaattorit kuvaavat uuden tuotantomenetelmän perusvaatimuksia. Vertaattaessa eri menetelmiä, tulee ottaa huomioon eri menetelmien taloudellinen arviointi. Taloudellisessa arvioinnissa tulee arvioida tuotantoteknologialla saavutettavaa kustannussäästöä ja liikevoittoa (EBIT). Arvioinnissa tulee myös huomioida arvoa ja myyntiä lisääviä hyötyjä, joita voidaan saavuttaa uudella tuotantoteknologialla, ja tuotteiden uusilla ominaisuuksilla.

Tuotantoteknologiaa arvioitaessa tulee huomioida vaiheajat, esimerkiksi materiaalia lisäävässä valmistuksessa SLM-menetelmä kärsii pitkästä vaihe-ajasta, joka tulee huomioida uuden tuotantoteknologian kapasiteettia arvioitaessa. Taloudellisessa arvioinnissa tulee huomioida uuden tuotantoteknologian käyttökustannukset, sisältäen palkat, materiaalikustannukset, ja tukitoimintojen kustannukset, kuten erilaiset suojakaasut laserhittauksessa, jäähdytysnesteet ja ilmanvaihto ja muut ympäristöstä aiheutuvat kustannukset. Myös erilaiset säästöt materiaaleissa ja tuotannon vaiheiden yhdistämisessä tulee huomioida.

Roland Berger on arvioinut vuonna 2013 SLM-menetelmän maturiteetin olevan tasojen 5 ja 7 välissä lentokoneteollisuuden tarpeisiin. Peters arvioi SLM-menetelmän maturiteetin olevan tasolla 3 vuonna 2015, koska sen teknologinen kyvykkyys ei ole riittävällä tasolla. Teknologisella kyvykkyuden puuttumisella Peters tarkoittaa sitä, että menetelmästä ei ole vielä teollisuudessa todistettua laaduntuottoa ja menetelmän toistettavuus on vielä tutkimusvaiheessa. (Peters 2015)

Frost&Sullivan on arvioinut suorakerrostuksen maturiteettitason olevan tasolla 3, asteikolla 1-10. Frost&Sullivan:in mukaan suorakerrostuksen yksi tärkeimmistä eduista on mahdollisuus valmistettavan kappaleen raerakenteen (grain structure) kontrollointiin. Heidän mukaan suorakerrostusta on käytetty suunnittelussa, kehityksessä ja prototyyppien nopeassa valmistuksessa. Teknologiaa on alettu käyttämään myös melko yksinkertaisten ja toiminnallisten komponenttien valmistuksessa. Heidän mukaan suorakerrostamisella valmistetut kappaleet vaihtelevat materiaalista riippuen ja suorakerrostettu pinta vaatii usein jälkikäsittelyä. Suorakerrostusteknologioille, joilla voidaan valmistaa kappaleita sulattamalla metallijauhetta, on löytynyt mahdollisia käyttökohteita ilmailu-, öljy- ja kaasu-, sekä autoteollisuudesta. Metallin sulattaminen laserilla vaatii kuitenkin laajempaa hyväksyntää yleistyäkseen. (Frost&Sullivan 2015, s. 15.)

4.4.2 Digitaalista materiaalia lisäävää valmistusta (DDM) edistävät tekijät

Materiaalia lisäävän valmistuksen yleistymistä voidaan perustella sen ominaisuuksilla, jotka mahdollistavat kyseisen valmistusmenetelmän käyttöönoton uusissa sovelluksissa. Näitä ominaisuuksia ovat:

1. Uniikit muodot kustomoiduissa tuotteissa
2. Monimutkaiset muodot, jotka mahdollistavat tuotteen paremman toiminnollisuuden
3. Yhden kappaleen eräkokoa mahdollistaa kustomoitujen kappaleiden valmistuksen taloudellisesti
4. Nopea läpimenoaika säästää aikaa ja kustannuksia ja parantaa asiakastyytyväisyyttä
5. Digitaalisen valmistuksen avulla voidaan tarkasti monistaa kappaleita CAD-mallin avulla
6. Digitaalinen tallennus, jonka avulla voidaan uudelleen käyttää vanhoja malleja
7. Elektroniset varaosat, säilytetään varaosia digitaalisessa muodossa, eikä varastossa
8. Valmistus ei vaadi työkaluja, eli ei ole tarvetta suunnitella, valmistaa ja säilöä työkaluja niin kuin perinteisessä valmistuksessa. Se mahdollistaa taloudellisen piensarjatuotannon
(Gibson *et al.* 2010 s. 383.)

4.4.3 Tulevaisuuden näkymät

Materiaalia lisäävä valmistus on osa teollisuuden digitaalista vallankumousta. Tällä hetkellä sekä yksityiset yritykset että valtiot investoivat materiaalia lisäävään valmistukseen

suuria summia ja lähivuosina on odotettavissa merkittäviä kehitysaskeleita teknologioissa. Kehitystä on odotettavissa etenkin metallisten lopputuotteiden valmistukseen materiaalia lisäävillä menetelmillä.

Lähivuosina metallien materiaalia lisäävän valmistuksen kilpailukyky tulee paranemaan merkittävästi verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Materiaalia lisäävä valmistus ei tule kuitenkaan syrjäyttämään perinteistä konepajateollisuutta, vaan se tulee olemaan yksi menetelmä muiden joukossa.

Metallien materiaalia lisäävien laitteiden hintojen ei odoteta laskevan merkittävästi, mutta raaka-aineiden, pääasiassa jauheiden hinnat tulevat laskemaan kilpailun kiristyessä. Tulostusnopeuden oletetaan kasvavan moninkertaisesti nykyisestä ja jauhepetisulatuksessa kammion koko tulee kasvamaan mahdollistaen suurempien kappaleiden tulostuksen. Myös materiaalia lisäävän valmistuksen standardien, ohjelmistojen, prosessiymmärryksen ja laitteiden kehittyessä laadunvalvonta raaka-aineesta lopputuotteeseen tulee kehittymään ja yhdenmukaistumaan huomattavasti.

Tähän asti materiaalia lisäävässä valmistuksessa on keskitytty lähinnä tulostusprosessiin ja sen kehittämiseen. Materiaalin käsittely on myöskin saatu hyvin pitkälle automatisoitua, nyt kehityskohteina alkavat olla tulostusta edeltävien ja sen jälkeisten työvaiheiden automatisointi. Teknologian teollistamisen ja automatisoinnin kehittyessä, voidaan integroida materiaalia lisäävä tulostuspää CNC-työstökoneisiin ja siten integroida suorakerrostus osaksi konepajan tuotantojärjestelmää. Niin sanottu hybridi-menetelmä antaakin mahdollisuuden myös pienille yrityksille materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämiseen. (Chekurov *et al.* 2017, s. 38.)

Uuden teknologian elinkaaren vaiheita markkinoilla voidaan kuvata konsulttiyhtiö Gartnerin Hype Cycle-mallin avulla. Kuvassa 20 on vuoden 2015 Hype Cycle-malli, jonka mukaan yritysten 3D-tulostus on yleistynyt ja sen odotetaan vakiintuvan 2-5 vuoden kuluessa.

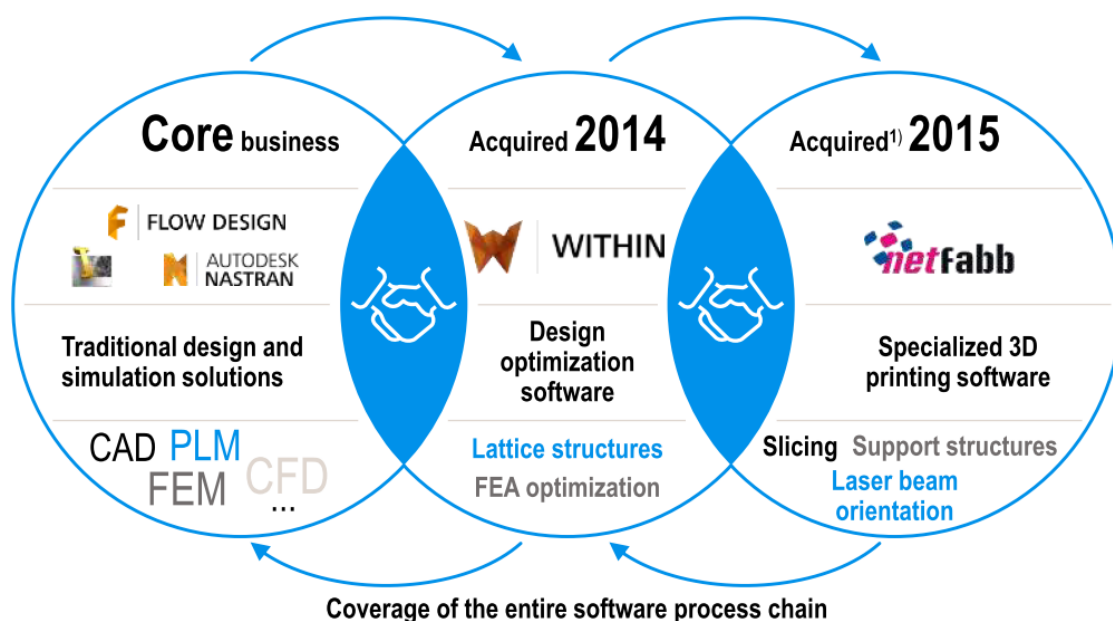


Kuva 20. Kehittyvien teknologioiden Hype Cycle-malli. (Gartner 2015)

4.4.4 Materiaalia lisäävän valmistuksen vaikutukset suunnitteluun ja tuotantoon tulevaisuudessa

Roland Bergerin mukaan materiaalia lisäävä valmistus on saavuttanut riittävän maturiteetin sarjatuotantoa varten, mutta lisääntyvää kasvua ja uusia innovaatiota on odotettavissa. Roland Berger ennustaa materiaalia lisäävän valmistuksen kehitystä 5-15 vuodessa, ennusteen mukaan nopeasti saatavien prototyyppien, valmistuksen yksinkertaistumisen ja kehittyvien digitaalisten teknologioiden seurauksena koneiden suunnittelu ja valmistus kehittyvät enemmän ohjelmointisuunnittelun kaltaiseksi.

Mekaanisten osien hinnat tulevat laskemaan lisääntyneen digitalisaation ja automaation seurauksena. Ohjelmistojen tärkeys ja ohjelmistojen kehittäjien määrä tulee kasvamaan. Tuotanto ja informaatioteknologia lähestyvät toisiaan ja esineiden internet kehittyvät. Tuotteen elinkaaret lyhenevät, variantit ja massakustomointi lisääntyvät ja asiakkaat tulevat vaatimaan monimutkaisempia tuotteita. Materiaalia lisäävä valmistus yksinkertaistaa perinteistä monimutkaista valmistusta, koska materiaalia lisäävässä valmistuksessa CAD-malli on valmis tuote. Autodesk saattaa olla ensimmäinen ohjelmistovalmistaja, joka tarjoaa kattavan ohjelmiston materiaalia lisäävän valmistuksen tarpeisiin. Kuvassa 21 on esitetty Autodeskin kehitteillä olevia ohjelmistoja. (Berger 2016 s. 17.)

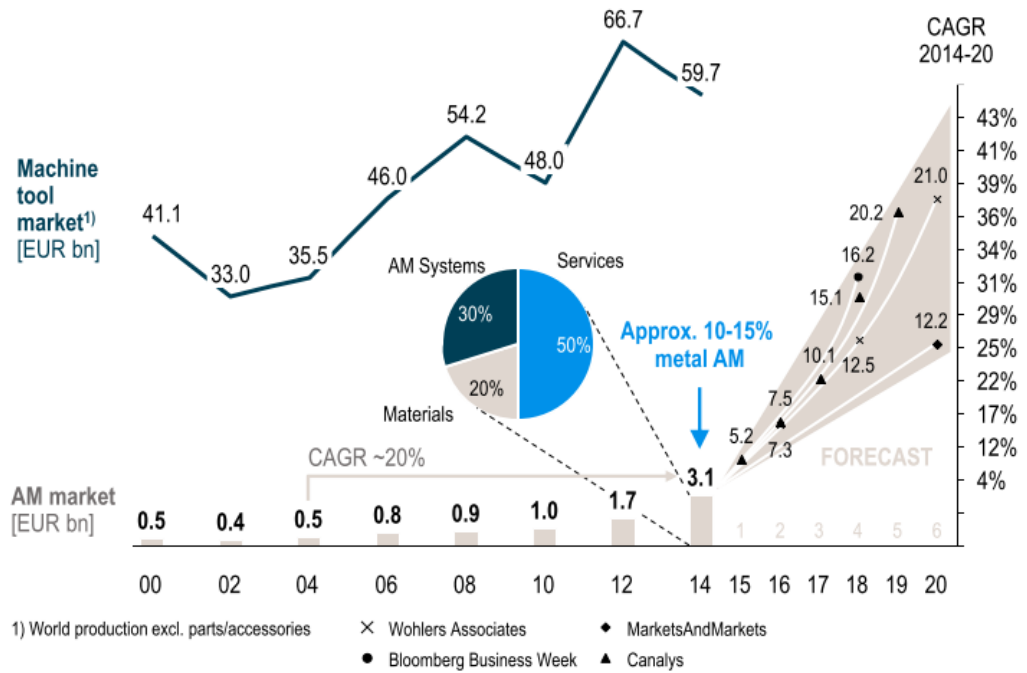


Kuva 21. Autodesk on ohjelmistovalmistaja, joka kehittää ohjelmistoja materiaalia lisäävän valmistuksen tarpeisiin. (Berger 2016 s. 17)

4.4.5 Materiaalia lisäävän valmistuksen markkinoiden kehitys

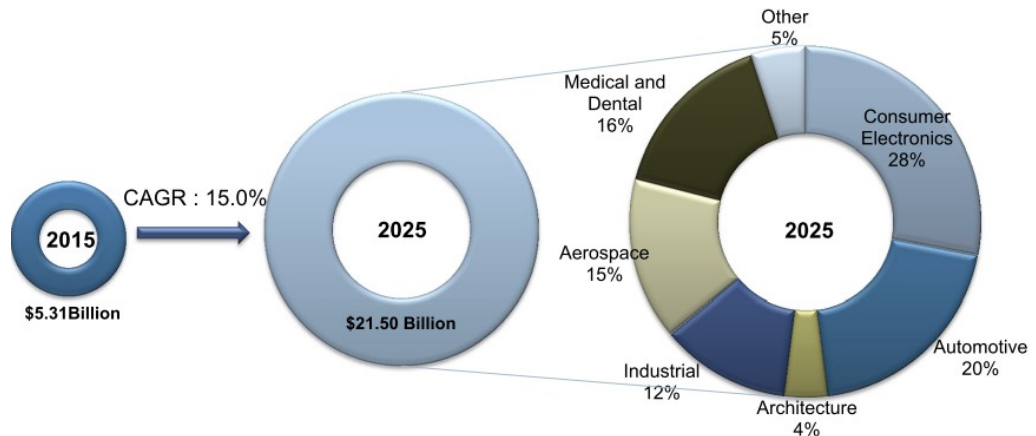
Materiaalia lisäävän valmistuksen markkinoiden odotetaan kasvavan merkittävästi 2020 mennessä, jopa 40% vuosittaista kasvua on ennustettu tutkijoiden toimesta. Verrattaessa työstökonemarkkinoihin metallien materiaalia lisäävä valmistus on vielä todella pientä, vuonna 2014 alle 1% työstökonemarkkinoihin verrattuna. Vuodesta 2004 vuoteen 2014 materiaalia lisäävä valmistus on kasvanut keskimäärin (CAGR) 20% vuosittaisella kasvuvauhdilla. Kasvu on kiihtynyt ja vuodesta 2010 vuoteen 2014 ja kasvanut keskimäärin (CAGR) 30% vuosittain. Erilaisten ennusteiden mukaan markkinan odotetaan moninkertaistuvan 2-7 kertaista vuoteen 2020 mennessä. Kuvassa 22 on esitetty ennustus materiaalia lisäävän valmistuksen markkinoiden kehitystä. (Berger 2016 s. 76.)

Global AM market



Kuva 22. Ennustus materiaalia lisäävän valmistuksen markkinoiden kehityksestä. (Berger 2016 s. 76)

Frost&Sullivan on ennustanut vuonna 2016 että vuonna 2020 yli puolet materiaalia lisäävän valmistuksen markkinoista on lääketieteellisessä-, auto- ja ilmailuteollisuudessa. Kuvassa 23 näkyy Frost&Sullivan:in ennustus markkinoiden jakautumisesta ja kasvusta vuoteen 2025 mennessä.

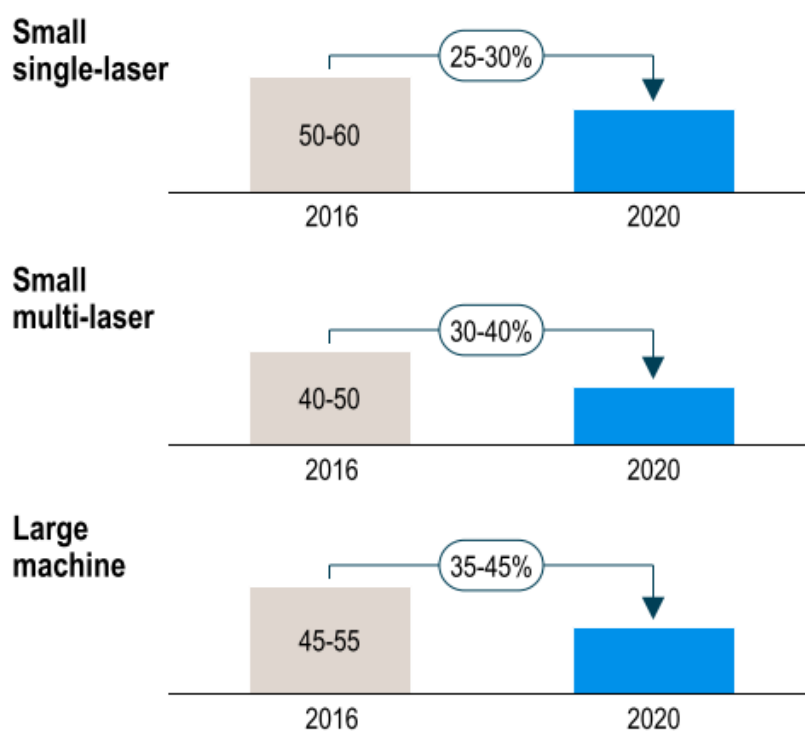


Kuva 23. Materiaalia lisäävän valmistuksen markkinoiden kehitys (Frost & Sullivan's Global 360° Research Team 2016, s. 23)

4.4.6 Laitteiden ja materiaalien hintojen kehitys

Useita lasereita käyttävät laitteet ovat tehokkaampia ja siten taloudellisempia sarjatuotannossa, vaikka niiden hankintakustannukset ovat korkeammat, niillä voidaan valmistaa kappaleita 20% halvemmalla hinnalla, kuin pienellä yksilaserisella laitteella. Työvoimakustannukset ovat keskimäärin alle 10% kokonaiskustannuksista. Materiaalia lisäävän valmistuksen kustannusten odotetaan laskevan noin 25-45% vuoteen 2020 mennessä joutuksen kasvavasta lasertehosta, pulverin annostelun optimoinnista ja suurempien tulostuskerrosten käytöstä. Useiden lasereiden käytöllä voidaan tehostaa tulostusta, käyttäen samaa laitteistoa. Seuraavassa kuvassa 24 on esitetty materiaalia lisäävän valmistuksen arvioitua kustannuskehitystä eri laitteille vuoteen 2020 mennessä, kustannusten kehityksessä ei ole huomioitu mahdollisia teknologista kehitystä, joka saattaa alentaa kustannuksia. (Berger 2016, s. 65-77.)

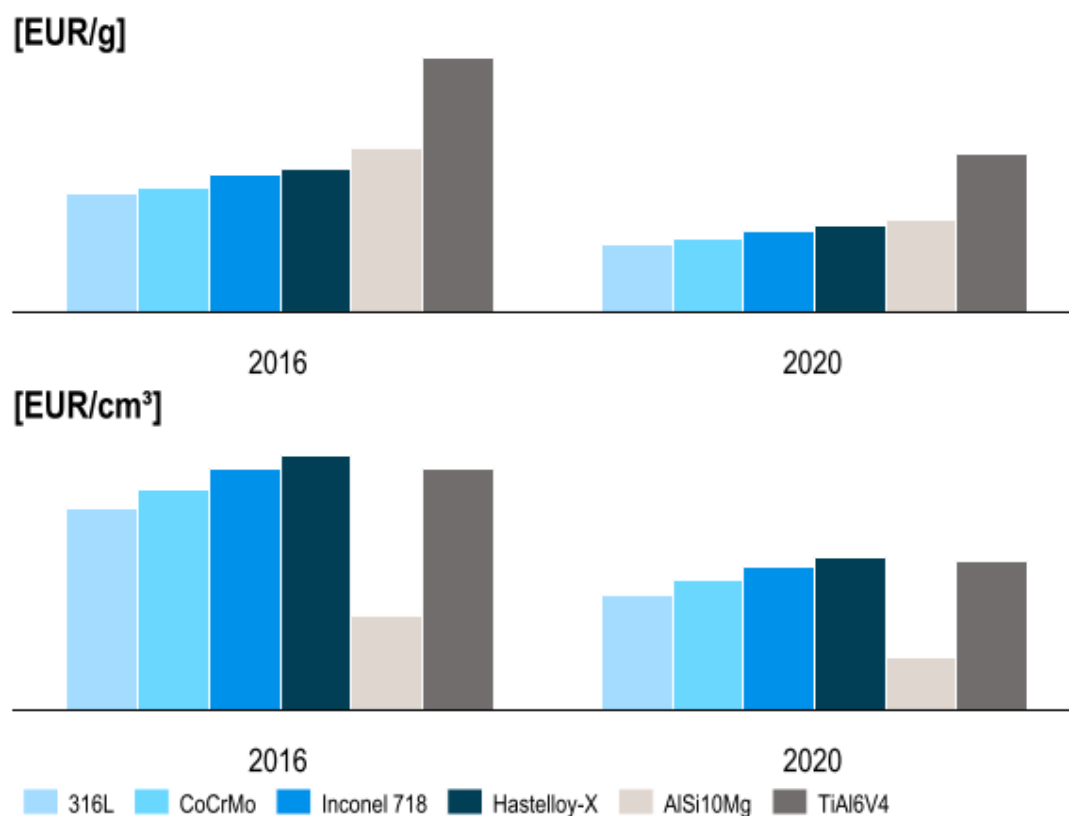
AM cost by system class (material: Inconel 718)



Kuva 24. AM kustannusten (sis. laitteisto, työvoima ja materiaali) kehitys (Berger 2016 s. 70)

Materiaalikustannus materiaalia lisäävän valmistuksen kustannuksissa vaihtelee paljon riippuen materiaalista ja saavutettavasta tulostusnopeudesta. Metallien 316L, CoCrMo, Inconel 718 ja Hastelloy-X materiaalikustannukset riippuvat paljon metallijauheen hinnoista, koska kyseiset metallit ovat lähes yhtä tiheitä ja niitä voidaan tulostaa yhtä nopeasti. TiAl6V4 on hinnaltaan kallein metallijauhe, mutta sen tiheys on pieni ja sitä voidaan

tulostaan nopeasti, mikä laskee kustannuksia suhteutettuna tulostetun kappaleen tilavuuteen. AlSi10Mg:lla on pieni tiheys, mistä johtuen sen tulostuskustannus suhteutettuna tulostetun kappaleen tilavuuteen on pieni. Kuvassa 25 on esitetty eri materiaaleista aiheutuvia kustannuksia ja niiden kehitystä. (Berger 2016, s. 65-77.)



Kuva 25. Eri materiaaleista aiheutuvat kustannukset ja niiden arvioitu kehitys (Berger 2016 s. 71)

5 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN HYÖDYNTÄMINEN YRITYKSEN LIIKETOIMINNASSA

Materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämismahdollisuuksia yrityksen liiketoiminnassa selvitettiin haastattelututkimuksen avulla, haastattelumenetelmänä oli puolistrukturoitu haastattelu, eli teemahaastattelu. Haastatteluiden tavoitteena oli selvittää suorakerrostuksella mahdollisesti saatavia hyötyjä yrityksen tuotteissa ja tuotannossa. Haastattelutavat ovat yrityksen henkilöstöä ja heitä oli yhteensä kymmenen, neljä tuotannon asiantuntijaa, neljä teknisen asiakaspalvelun asiantuntijaa ja kaksi myynti-insinööriä.

5.1 Puolistrukturoitu haastattelu

Puolistrukturoitu haastattelumenetelmä valikoitui siksi että haluttiin selvittää suorakerrostuksella saavutettavia hyötyjä yrityksen tuotteisiin ja tuotantoon teoriaosuudessa selvitettyjen suorakerrostuksen hyötyjen pohjalta. Suorakerrostuksen hyödyistä muodostettiin teemoja, joiden perusteella haastattelukysymykset tehtiin.

Puolistrukturoidussa haastattelussa kaikille haastateltaville esitetään samat tai lähes samat haastattelukysymykset samassa järjestyksessä. Haastattelulle on muodostettu teemat ja lisäksi on mietitty tarkkoja kysymyksiä halutuista teemoista. Puolistrukturoitu haastattelu sopii tilanteisiin, joissa haastateltaville ei ole tarpeellista antaa kovin suuria vapauksia ja halutaan saada selville tietoa ennalta määrätyistä asioista. Haastatteluista saatava aineisto on kvalitatiivista, eli laadullista tutkimusaineistoa, jonka avulla aihetta voidaan tutkia syvällisesti. Laadullisen tutkimusaineiston käsittely on usein hidasta, aineiston syvällisyydestä johtuen.

Haastatteluista muodostetun tutkimusaineiston analysoinnilla pyritään saamaan vastauksia tutkimuskysymyksiin. Tutkimusaineiston analysointitapoja on kaksi, sisällön analyysi ja sisällön erittely. Sisällön analyysissä kuvataan tutkimusaineistoa sanallisesti, kun taas sisällön erittelyssä kuvataan tutkimusaineistoa kvantitatiivisesti, eli painottuen esille tulleiden asioiden lukumääriin.

Sisällön analyysissä on kolme eri tapaa, aineistolähtöinen, teorialähtöinen tai teoriaohjaava analyysi. Tässä työssä on käytetty aineistolähtöistä, eli induktiivista analyysiä. Induktiivisessa analyysissä tutkimusaineistoa pelkistetään tutkimuskysymysten mukaan ja jäsennetään tyypittelemällä, teemoitteleamalla tai luokittelemalla. Luokittelussa painotetaan lukumääriä, eli kuinka usein asiat esiintyvät aineistossa. Teemoittelussa painotus on teemojen sisällössä eikä lukumäärissä. Tyypittelyssä painotetaan löydettyjä tyyppejä,

eikä lukumääriä. Tässä tutkimuksessa on käytetty teemoittelua induktiivisessa analyysissä. (Tuomi & Sarajärvi 2002)

5.2 Haastatteluiden suorittaminen

Haastattelut suoritettiin yrityksen tiloissa. Haastateltaville lähetettiin haastattelukysymykset etukäteen ennen haastattelua, jotta he pystyivät valmistautumaan ja miettimään vastauksiaan etukäteen. Haastattelukysymyksistä oli kaksi eri versiota, toinen tuotannon asiantuntioille, ja toinen teknisen asiakaspalvelun asiantuntijoille ja myynti-insinööreille. Tuotannon haastattelukysymykset ovat liitteenä A ja teknisen asiakaspalvelun haastattelukysymykset ovat liitteenä B.

Haastattelukysymyksiä suunnitellessani, pyrin painottamaan suorakerrostuksella saatavia hyötyjä ja jättämään menetelmän rajoitteet pienemmälle huomiolle, sillä siten mahdollisesti löytyisi enemmän suorakerrostuksen hyödyntämismahdollisuuksia yrityksen tuotteille ja tuotannolle. Haastatteluiden ennakko-oletuksena on ollut, että suorakerrostuksella voidaan valmistaa toiminnallisilta ominaisuuksiltaan vastaava tuote kuin perinteisilläkin valmistusmenetelmillä. Ennen haastatteluja pidin lyhyen esityksen suorakerrostuksesta ja sen mahdollisuuksista, jotta haastateltavat saivat paremman käsityksen menetelmästä ja sen mahdollisuuksista.

Tuotannon asiantuntijoiden haastattelukysymykset sisälsivät kysymyksiä suorakerrostuksen hyödyntämisestä susikappaleiden korjauksessa, perinteisen valmistuksen helpottamisessa sekä materiaalia lisäävän ja poistavan valmistuksen yhdistämisessä. Kysymyksissä käytiin myös läpi suorakerrostuksen hyödyntämistä sellaisten kappaleiden valmistamisessa, joiden perinteinen valmistaminen vaatii paljon materiaalin poistoa. Kysymyksien avulla selvitettiin myös saavutettavia hyötyjä tuotannon erilaisten hukkien vähentämisessä ja läpimenoaikojen lyhentämisessä.

Teknisen asiakaspalvelun asiantuntijoiden haastattelukysymykset sisälsivät kysymyksiä hammaspyörien keventämisestä, sisäisistä kanavista, ominaisuuksien lisäämisestä ole-massa olevaan kappaleeseen, usean materiaalin yhdistämisestä, pinnoituksista ja korjauksista, suunnittelussa vaadittavasta ajattelutavan muutoksesta, perinteisesti valmistettavien hammaspyörien tuotannon helpottamisesta, hybridimenetelmistä ja sellaisten hammaspyörien valmistuksesta, joiden perinteinen valmistaminen vaatii paljon materiaalin poistoa.

Haastattelun lopuksi kysyin sekä tuotannon että teknisen asiakaspalvelun asiantuntijoilta heidän henkilökohtaista mielipidettä materiaalia lisäävästä valmistuksesta ja sen hyödyntämisestä yrityksen tuotannossa.

Tuotannon asiantuntijoiden haastattelut kestivät puolesta tunnista tuntiin ja teknisen asiakaspalvelun asiantuntijoiden haastattelut kestivät tunnista puoleen toista tuntiin. Haastattelut nauhoitettiin ja litteroitiin.

5.3 Haastattelujen analysointi ja johtopäätökset

Haastatteluissa saadun tutkimusaineiston analyysin avulla tein johtopäätöksiä suorakerrosten hyödyntämismahdollisuuksista yrityksen kartiohammaspyörille ja uusille tuotteille.

5.3.1 Hammaspyörien suorakerrostus

Kartiohammaspyörien osalta haastatteluista kävi ilmi, että meriteollisuuteen menevät luokitettavat hammaspyörät ovat tällaisen uuden tuotantoteknologian kannalta haasteellisimpia tuotteita. Suorakerrosten hyödyntäminen luokitettaville hammaspyörille vaatisi luokituslaitoksen hyväksynnän ja sen todettiin olevan melko hankalaa haastatteluiden perusteella.

Ei luokitettavien hammaspyörien osalta voimaa välittävien piirteiden, kuten hampaiden, kiilaurien ja uritusten valmistaminen suorakerrosten avulla todettiin olevan erittäin haasteellisia tällä hetkellä, koska standardit eivät tunne tätä valmistusmenetelmää vielä. Lisäksi hampaiden tulostamisen onnistuminen suorakerrosten avulla todettiin olevan hyvin epätodennäköistä lujuusominaisuuksien puolesta ja hiiletyskerrosten tulostaminen hampaan pintaan lähes mahdotonta metallurgisessa mielessä.

5.3.2 Hammaspyörien keventäminen

Hammaspyörien keventämisellä ei haastatteluiden perusteella saataisi suuria hyötyjä nykyisissä tuotteissa, jos hammaspyöriä haluttaisiin valmistaa suorakerrosten avulla ja tehdä niistä kevyempiä, pitäisi löytyä uusia käyttökohteita, joissa hammaspyörien keveydestä saataisiin hyötyjä. Haastattelujen perusteella kävi ilmi että tuotannossa voitaisiin saavuttaa säästöjä hammaspyörien keventämisellä, sillä materiaali ja lämpökäsittely maksaisivat vähemmän, jos hammaspyörä olisi kevyempi, myös hiilijalanjälki pienenesi hammaspyörien keventämisen ansiosta. Suunnittelussa hammaspyörien keventämisen seurauksena saatava dynaaminen käyttäytyminen voisi avata uusia suunnittelumahdollisuuksia voimansiirtolinjalle. Hammaspyörien keventämisestä voi myös olla haittaa, sillä keventämisen seurauksena hammaspyörien värinä ja resonanssit lisääntyvät ja voivat hajottaa hammaspyörän. Hammaspyörän kestävyys kannalta on hammaspyörän rungossa olta umpiainetta vähintään hampaan korkeuden verran.

5.3.3 Hammaspyörörien sisäiset kanavat

Sisäisillä kanavilla voisi saavuttaa hyötyjä silloin, jos koko hammaspyörä pystyttäisiin valmistamaan suorakerrostuksella. Sisäiset kanavat voisivat olla jäähdytys- tai voitelukanavia. Suurimmat hyödyt sisäisille kanaville olisi saavutettavissa sellaisiin hammaspyöröihin, jotka pyörivät suurella nopeudella. Yrityksen valmistamissa tuotteissa ei ole sellaisia tällä hetkellä. Hampaiden sisälle ei kuitenkaan voi tehdä kanavia, sillä silloin hampaan lujuusominaisuudet heikkenisivät liian paljon. Voitelukanavat voisivat olla mahdollisia hampaan juurelle. Sisäisten kanavien osalta haastatteluissa tuli ilmi käsite Smart Gear. Suorakerrostuksen avulla voisi mahdollisesti tehdä anturointeja sisäisiin kanaviin. Anturoinnin avulla voisi selvittää muun muassa hampaan identifiointi, sijainti ja toiminnollisuus.

5.3.4 Hammaspyörörien korjaukset

Hammaspyörörien korjaukset suorakerrostuksella olisivat potentiaalisimpia pehmeävaiheessa, hampaiden korjaukset eivät kuitenkaan todennäköisesti onnistu. Laakerikaulan, lautasen taustan ja asennusmitan korjaus suorakerrostuksella voisi onnistua, mutta luokitettaville hammaspyöröille olisi saatava luokituslaitoksen hyväksyntä tälle menetelmälle. Myös kaikki muut väärään mittaan koneistetut piirteet, pois lukien hampaat voisi korjata suorakerrostuksella. Hammaspyöröiden materiaalispekssi on kuitenkin todella tarkka ja suorakerrostettava materiaali tulisi olla täsmälleen samaa kuin perusaine. Suorakerrostuslaitteen hankintaa pelkästään korjauksia varten ei pidetty järkevänä ajatuksena.

5.3.5 Hammaspyöröiden pinnoitukset

Suorakerrostuksella valmistettavia pinnoituksia pidettiin mahdollisina hammaspyöröille, jotka eivät vaadi luokitusta. Haastatteluiden perusteella todettiin suorakerrostuksen olevan parempi menetelmä kuin kovakromaus ja suorakerrostuksella saavutettava gradientti pinnoituksessa ehkäisi pinnoitteen lohkeamisen. Hampaita pinnoitettaessa pinnoitteen tulisi olla erittäin ohut, jotta hammas ei vaatisi koneistusta pinnoittamisen jälkeen. Pinnoituksilla ei voida kuitenkaan korvata hiiletyskarkaistua hampaan pintaa. Laakerikaulojen pinnoitus kulutusta kestäväällä materiaalia voisi olla hyödyllinen joissain pinioneissa. Suorakerrostusta voisi hyödyntää sellaisissa kappaleissa, joissa jokin tietty, kooltaan pieni alue halutaan korroosion ja kulutuksen kestäväksi.

5.3.6 Hammaspyöröiden tuotanto

Tuotannossa suorakerrostuksella saavutettavat hyödyt jäivät haastatteluiden perusteella melko vähäisiksi. Suorakerrostuksen hyödyntäminen sellaisten hammaspyöröiden valmistamisessa, joiden koneistuksessa poistetaan paljon materiaalia, ei ole todennäköisesti kan-

nattavaa. Takeet ovat jo valmiiksi niin paljon lopputuotteen muodossa, että materiaali-poisto jää melko vähäiseksi. Jos koneistetaan tangosta, jolloin materiaalinpoistomäärät ovat suurempia, on yleensä kiire, koska ei ole saatu taeaihiota. Suorakerrostus on niin paljon hitaampaa kuin materiaalia poistava työstö, että sillä ei ole hyödyntämismahdollisuutta niissä tilanteissa. Myös pienemmille hammaspyörille saa nykyään muottitakeita parin euron kilohintaan, joten suorakerrostuksen hyödyntämismahdollisuudet ovat niissäkin heikot.

Tuotannossa voitaisiin saavuttaa säästöjä, jos joitain työvaiheita pystyttäisiin järkevästi ja tehokkaasti yhdistämään suorakerrostuksen avulla. Mitään konkreettisia esimerkkejä työvaiheiden yhdistämisestä ei kuitenkaan haastatteluissa tullut ilmi. Hammaspyöriin kryptäntävien holkkien tulostaminen voisi olla mahdollista ja itse mietin että olisikohan se sellainen työvaihe, jonka voisi yhdistää samalle työstökoneelle.

Valmistusta helpottavien piirteiden, eli hammastuskaulojen suorakerrostaminen olisi mahdollista kaikille hammaspyörille, koska se on vain väliaikainen piirre, joka poistetaan hammastuksen jälkeen, eikä siten vaikuta luokittajiin. Tällä hetkellä kuitenkin kaikki pehmeäsorvaukset tehdään alihankinnassa, joten alihankkijalla pitäisi olla tällainen suorakerrostuslaite. Myös saavutettava hyöty jäisi luultavasti melko vähäiseksi.

5.3.7 Uudet tuotteet

Muiden kuin hammaspyörien osalta haastatteluissa tuli ilmi että potentiaalisin suorakerrostuksen kannalta yrityksen nykyisistä tuotteista on impelleri. Impellerien koneistuksessa valuista koneistetaan noin puolet materiaalista pois. Impellereitä voisi valmistaa siten, että impellerin runko koneistetaan perinteisesti sorvaamalla ja sen jälkeen impellerin lavat valmistettaisiin suorakerrostuksella.

Haastatteluidan aikana pohdittiin että vääntyykö impellerien lavat suorakerrostuksen aikana lämpövaikutusten takia ja kestävätkö lavat koneistuksen suorakerrostuksessa syntyvistä jäännösjännityksistä huolimatta. Haastatteluiden aikana pohdittiin myös jännityksen poiston aiheuttamia muodonmuutoksien suuruuksia, ja sitä että vaatisiko impellerin lavat koneistusta jännityksenpoistossa tapahtuvien muodonmuutosten takia. Haastatteluissa pohdittiin myös sitä että kuinka suuria hyötyjä suorakerrostuksella voitaisiin saavuttaa verrattuna perinteiseen koneistukseen ja kuinka suuren bisneksen impellerien valmistuksesta voisi saada, että kannattaako niiden valmistukseen investoida.

Haastatteluissa kävi myös ilmi että impellerien suorakerrostusta tutkittaessa kannattaisi tehdä yhteistyötä asiakkaan kanssa, jotta suorakerrostuksen käyttöönotto olisi helpompaa ja uudella menetelmällä valmistetut impellerit olisivat sellaisia, joita asiakas haluaa. Haastatteluissa kävi myös ilmi että paineilmaa ohjaavat impellerit olisivat muodoltaan potentiaalisimpia suorakerrostuksella valmistettaviksi.

Haastatteluissa todettiin, että akseleiden mustanitruuksen voisi korvata laser cladding pinnoituksella. Laser cladding pinnoitus voisi olla kannattavampi kuin koko kappaleen lämpökäsittely, koska suojamaalaus mustanitruuksessa on haastavampi prosessi kuin hiiletyskarkaisussa.

5.3.8 Henkilökohtaiset mielipiteet

Yleinen mielipide materiaalia lisäävästä valmistuksesta ja sen hyödyntämisestä yrityksen tuotannossa oli, että erilaisissa pinnoituksissa ja korjauksissa kyseistä menetelmää voisi käyttää jo tällä hetkellä, mutta kappaleiden valmistukseen suorakerrostuksella ei vielä tällä hetkellä uskottu. Yrityksen nykyisten tuotteiden valmistuksessa ei nähty paljon mahdollisuuksia muutoin kuin impellerien osalta ja mahdollisesti joidenkin valmistusta helpottavien piirteiden osalta. Suorakerrostus koettiin erittäin mielenkiintoiseksi teknologiaksi ja haastateltavat olivat kiinnostuneita tietämään kyseisestä teknologiasta ja sen mahdollisuuksista lisää. Yleinen mielipide oli että materiaalia lisäävä valmistus ei tule valtaamaan massatuote markkinoita vielä seuraavan kymmenen vuoden aikana ja usein esiin nousi menetelmän kallis hinta ja valmistetun kappaleen ominaisuuksien riittämättömyys.

5.3.9 Muut esille tulleet asiat

Haastatteluissa ilmi tulleita huomion arvoisia asioita oli että ensin pitäisi saada oikeasta materiaalista suorakerrostuksella valmistettu testikappale, jolle tehdään lujuuskokeet, sen jälkeen, jos lujuusominaisuudet ovat riittävät, tulisi tutkia suorakerrostuksen kustannuksia. Toinen tärkeä asia oli se että yritys on komponenttitoimittaja, ja jos halutaan muuttaa asiakkaalle tehtävää tuotetta, tulee sen muutoksen olla sellainen, että se ei vaadi asiakkaalta yhtään mitään. Siksi kannattaisikin pohtia mahdollisia yhteistyömahdollisuuksia asiakkaan kanssa, koska muutosten tekeminen asiakkaan tuotteisiin on todella vaikea ja hidas prosessi. Jotta suorakerrostuksen hyödyt saataisiin mahdollisimman hyvin käyttöön, täytyisi suorakerrostuksella valmistettava tuote suunnitella uudestaan, jotta perinteisen valmistuksen aiheuttamat rajoitteet eivät näkyisi suorakerrostuksella valmistetussa tuotteessa. Suorakerrostuksen kokonaisvaltainen hyödyntäminen edellyttäisikin oman tuotteen valmistamista ja strategian muuttamista.

6 TULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI

6.1 Saavutettavissa olevat hyödyt

Haastatteluissa ilmi tulleita suorakerrostuksella tällä hetkellä saavutettavia hyötyjä yrityksen tuotteisiin ja tuotantoon olivat erilaiset korjaukset, pinnoitukset ja mahdollisesti paineilmaa ohjaavan impellerin siipien valmistaminen.

Tällä hetkellä ei ole kannattavaa valmistaa suorakerrostuksella samanlaista tuotetta kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä. Tuote pitäisi suunnitella uudestaan, siten että unohdetaan perinteisen valmistuksen aiheuttamat rajoitteet tuotteelle ja suunnitellaan tuotteesta entistä parempi kyseiseen käyttökohteeseen. Yrityksellä ei ole tällä hetkellä omaa tuotetta, joten tuotteen kehittämisessä kannattaisi selvittää yhteistyömahdollisuuksia asiakkaan kanssa.

Tulevaisuudessa jos menetelmä yleistyy ja teknologia kehittyy ja laitteet ja materiaalit halpenevat, lisääntyvät suorakerrostuksen hyödyntämismahdollisuudet myös hammaspyörien tuotannossa.

6.2 Teknologian sopivuus nykyiseen konekantaan

Metallien materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmistä suorakerrostus sopii parhaiten yrityksen nykyiseen konekantaan ja tuotantoon, koska suorakerrostuksella voidaan valmistaa suurempia kappaleita kuin muilla materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmillä ja menetelmän joustavuus ja mahdollisuus materiaalia lisäävän ja poistavan valmistuksen yhdistämiseen ja materiaalin vaihtamiseen ovat hyödyllisiä ominaisuuksia esimerkiksi erilaisissa pinnoituksissa ja korjauksissa, sekä erilaisten piirteiden lisäämisessä olemassa olevaan aihioon.

Yrityksen 5-akseliset koneistuskeskukset ovat potentiaalisia laitteita suorakerrostusmenetelmälle. Suorakerrostuspään integroiminen 5-akseliseen koneistuskeskukseen voisi olla yksi vaihtoehto suorakerrostuksen hyödyntämisessä. Hybrid Manufacturing Technologies on yritys, joka suunnittelee, rakentaa ja integroi laseria käyttäviä suorakerrostustyökaluja (LBMD) olemassa oleviin CNC-työkalualustoihin. (Gibson *et al.* 2010 s. 252-256.) Jos tehdään päätöksiä suorakerrostuslaitteen hankinnasta, kannattaa selvittää sopisiko Hybrid Manufacturing Technologiesin suorakerrostuspää olemassa oleviin koneistuskeskuksiin ja voitaisiinko sillä saavuttaa halutut materiaaliominaisuudet.

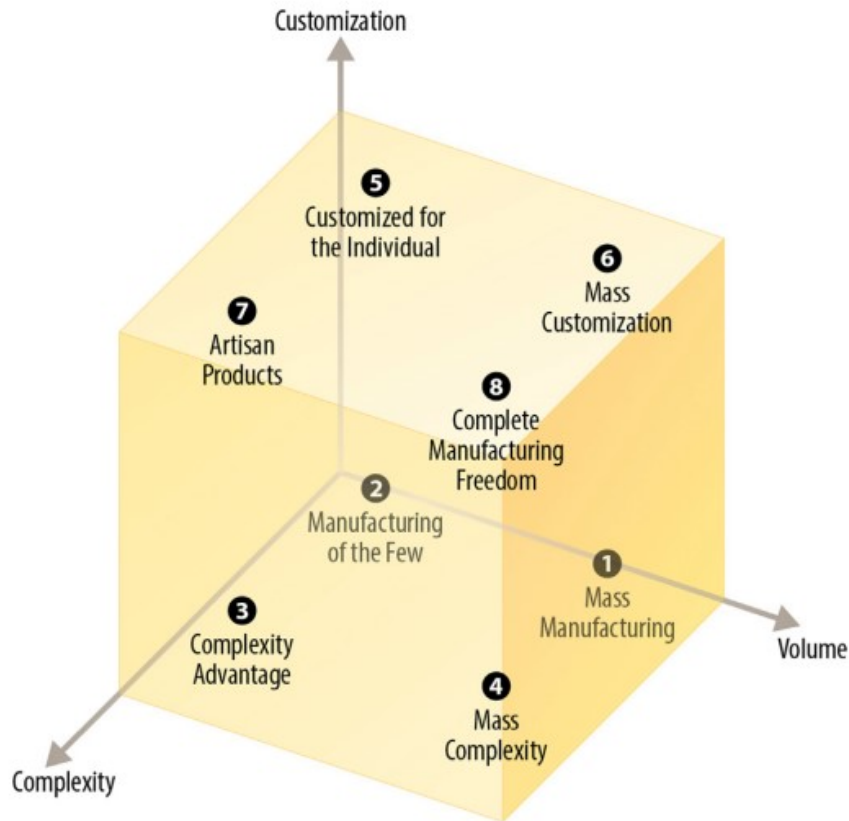
Yrityksen konekanta olisi sopiva myös suorakerrostamisella valmistettujen kappaleiden jälkikäsittelyyn, etenkin lämpökäsittely, hionnat ja koneistukset, sekä mittalaitteet ja

muut tarkistukset, koska suorakerrostuksella valmistetut kappaleet vaativat viimeistelykoneistuksen ja lämpökäsittelyn jäännösjännitysten poistamiseksi, sekä erilaisia tarkistuksia laadun varmistamiseksi.

6.3 Minkälaisia kappaleita kannattaa valmistaa suorakerrostuksella

Suorakerrostuksella kannattaa valmistaa sellaisia kappaleita, joissa saavutetaan hyötyjä keveydessä, usean osan yhdistämisessä, sisäisten kanavien valmistuksessa, eri materiaalien yhdistämisessä ja kappaleen kompleksisuudessa. Myös sellaisten kappaleiden valmistuksessa, joiden perinteinen valmistaminen vaatii paljon materiaalia poistavaa työtä, voidaan saavuttaa hyötyjä materiaalin säästössä ja valmistusajassa. Etenkin sellaiset kappaleet, joissa on kohtuullisen ohuita ulokkeita, ovat potentiaalisia tuotteita, koska sellaisia voi valmistaa suorakerrostuksella nopeasti. Sellaiset tuotteet jotka ovat varioituvia, räätälöitäviä ja kompleksisia ovat myös potentiaalisia suorakerrostuksella valmistettavaksi. Suorakerrostuksen suurimmat hyödyt luodaan kuitenkin suunnittelussa ja suunnittelemalla entistä toimivampia tuotteita voidaan saavuttaa suuria hyötyjä.

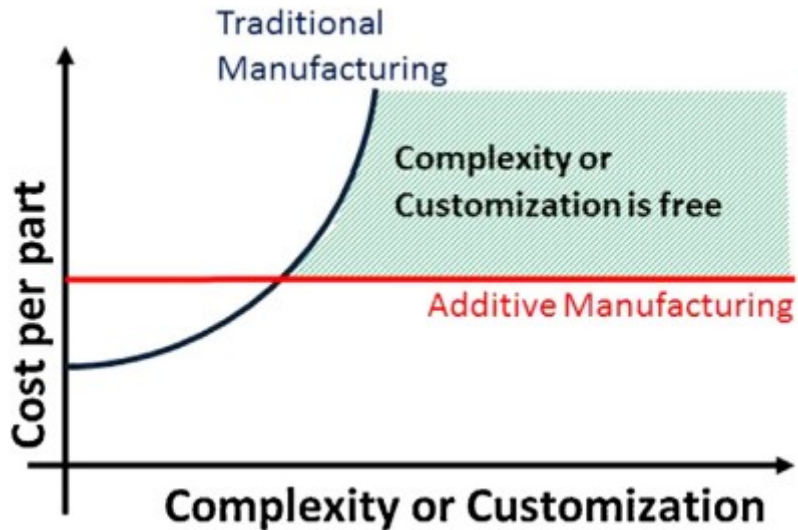
Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa erittäin kompleksisten ja kustomoitujen tuotteiden valmistuksen, entistä nopeammin ja edullisemmin. Tätä havainnollistetaan kuvassa 26 kohdassa 7. Materiaalia lisäävä valmistus kehittyy kohti kohtaa 8, mutta tällä hetkellä rajoitteina ovat valmistettavien kappaleiden koko ja valmistusmenetelmien hitaus. Materiaalia lisäävän valmistuksen tarkkuuden, toistettavuuden ja eri materiaalien käytettävyyden tulee parantua, jotta valmistuksen täydellinen vapaus voidaan saavuttaa. (Conner, B.P *et al.* 2014, s. 66-69.)



Kuva 26. Malli valmistettavista tuotteista (Conner, B.P et al. 2014, s. 66)

Perinteisessä valmistuksessa keskitytään ensisijaisesti massatuotantoon, jossa on mahdollisimman vähän kustomoituja osia, jotta tuotantomäärät saadaan korkeiksi ja tuotantolaitteista johtuvat kustannukset mahdollisimman alhaisiksi. Massatuotannossa ei keskitytä tuotteen ominaisuuksien, kuten keveyden parantamiseen, vaan tuotantoprosessin tehokkuuteen ja tuotantokustannusten minimointiin. Tätä havainnollistetaan kuvassa 26 kohdassa 1.

Perinteisessä valmistuksessa kappaleen kompleksisuus ja kustomointi nostavat kappaleen valmistuskustannuksia. Materiaalia lisäävässä valmistuksessa kompleksisuus ja kustomointi ovat ilmaisia. Tätä havainnollistetaan kuvassa 27.



Kuva 27. Materiaalia lisäävässä valmistuksessa kompleksisuus ja kustomointi ovat ilmaisia. (Conner, B.P et al. 2014, s. 71)

6.4 Impellerin suorakerrostus

Haastatteluissa nousi usein esiin paineilmaa ohjaava impelleri, joka voisi olla sellainen tuote, jonka valmistaminen materiaalia lisäämällä voisi olla kustannusmielessä järkevää. Seuraavissa laskuissa arvioidaan paineilmaa ohjaavan impellerien valmistuskustannuksia perinteisellä koneistuksella ja suorakerrostuksella. Laskuissa on käytetty 160 mm halkaisijaltaan olevaa impelleriä. Kyseisen impellerin CAD-malli on kuvassa 28.



Kuva 28. Paineilmaa ohjaava impelleri, jonka halkaisija on 160 mm (Olsson 2003, s. 1)

6.4.1 Kustannusarvio 1

Perinteisen koneistuksen kustannusarvio perustuu impellerin koneistusaikaan, koneistuksessa käytettyyn tuntikustannushintaan ja materiaalikustannukseen. Koneistusajaksi arvioitiin 2.9 tuntia, koneistusaika ja eri vaiheet ovat kuvassa 29.

Operation	Tool	Flutes	Feed MM/IN	RPM	Time
Roughing	10mm Bullnose R2	4	787 / 31.0	1910	2.9 min
Roughing	8mm Bullnose R2	4	857 / 33.8	2387	1.3
Blades Semi	10mm Bullnose R2	4	458 / 18.0	1910	0.9
Blades Semi	8mm Ball 3 deg taper	3	298 / 11.7	1989	1.4
Hub Semi	8mm Ball 3 deg taper	3	573 / 22.5	3183	2.9
Lead Edges	8mm Ball 3 deg taper	3	637 / 25.0	3183	1.3
Hub Finish	8mm Ball 3 deg taper	3	716 / 28.0	716	4.3
Blades Finish	8mm Ball 3 deg taper	3	119 / 4.7	119	3.4
Fillet Finish	6mm Ball 3 deg taper	3	430 / 16.9	430	2.7
Total for 8 pockets					2.9 hours

Kuva 29. Impellerin koneistusaika ja koneistusvaiheet (Olsson 2003, s. 10)

Koneistuksen tuntihinta on 140€ ja materiaalikustannus on 45€/kg. Tankoaihion massa on 18,7 kg, ja tankoaihion sahaus maksaa 50€.

Siten perinteisen valmistuksen kustannukseksi saadaan:

$$2,9h * 140€ + 18,7 \text{ kg} * 45 \text{ €/kg} + 50€ = 1297.5€$$

Haastatteluissa tuli sellainen idea, että impellereitä voisi valmistaa suorakerrostuksella siten, että pelkät siivet tulostettaisiin perinteisesti sorvattuun aihioon. Seuraavassa kustannusarviossa lasketaan impellerin valmistuskustannukset materiaalia lisäävän ja poistavan valmistuksen yhdistämisellä.

Lähtötietoina on materiaalikustannus, koneistusaika, suorakerrostusaika, suorakerrostuslaitteen kustannus, suorakerrostettavan jauheen kustannus ja lämpökäsittely.

Siipien massa impellerissä on 240g ja sorvatun aihion massa on 2 kg. Wohlersin 2010, s. 55 mukaan puhdas titaani maksaa jauheena 340-880 \$/kg. Lämpökäsittelyn kustannus on noin 100€. Jos suorakerrostuslaitteena olisi DMG Mori Seiki, Lasertec 65, olisi koneen hankintakustannus 800 000 € ja tulostusnopeus 0,5 kg/h. Taulukossa 1 on kustannusarvion lähtöarvot.

Taulukko 1. Impellerin suorakerrostuksen kustannusarvion lähtöarvot.

Impellerin valmistuskustannusarvion lähtöarvot	
Perinteinen koneistusaika (h)	2,9
Koneistuksen tuntihinta (€/h)	140
Tankoaihion massa (Kg)	18,7
Sahaus (€)	50
Tankoaihion hinta (€/Kg)	45
Siipien massa (Kg)	0,24
Aihion massa (Kg)	2
Titaanijauhe hinta (€/Kg)	400
Lämpökäsittely (€)	100
Koneen hankintahinta (€)	800000
Tulostusnopeus (Kg/h)	0,5
Tarvittava jauhe (Kg)	0,4
Huoltokustannus/vuosi (€)	30000
Laitteen käyttöaika/vuosi (h)	4160
Laitteen poistoaika(vuotta)	5
Laskentakorkokanta	0,05
Investoinnin JA (€)	50000
Siipien tulostusaika (h)	0,8
Viimeistelykoneistus (h)	0,25

Lasketaan ensin pelkästään siipien tulostuksesta aiheutuvat kustannukset:

Arvio tarvittavasta jauhemäärästä (tulostettavien siipien massa koneistusvaralla + ylimääräinen jauhe): 400g

Laitteen käyttöaika: 4160 h/vuosi

Laitteen poistoaika: 5 vuotta

Laiteinvestoinnista aiheutuva vuosittainen kustannus (A) saadaan laskettua seuraavalla kaavalla (1) ja annuiteettitekijä ($C_{n/i}$) saadaan kaavasta (2)

$$C_{n/i} \times \left[H - \frac{JA}{(1+i)^n} \right] \quad (1)$$

$$C_{n/i} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

$C_{\frac{n}{i}}$ = annuitettitekijä

H = hankintahinta

i = laskentakorkokanta

n = investoinnin pitoaika

JA = investoinnin jäännösarvo

hankintahinta = 800 000 €

laskentakorkokanta i = 5 %

investoinnin pitoaika n = 5 vuotta

investoinnin jäännösarvo JA = 50 000 €

$C_{n/i}$ = 0,231

A = 175731€

Laitteen hankintakustannukset/ koneistustunti = 42,24€

Laitteen hankinnasta kohdistuu siipien tulostuksesta ja koneistuksesta yhdelle impellerille kustannuksia $(0,8 \text{ h} + 0,25 \text{ h}) * 42,24\text{€} = 44,4 \text{ €}$

Huoltokustannukset = 30 000 € / vuosi

Siipien tulostuksen kesto: 0,8 h

Viimeistelykoneistuksen arvioitu kesto = 0,25 h

Huoltokustannuksia kohdistuu yhdelle impellerille = $7,2 \text{ €/h} * (0,8 \text{ h} + 0,25 \text{ h}) = 7,6 \text{ €}$

Materiaalikustannusarvio yhden impellerin siiville = $400 \text{ €/kg} * 0,4 \text{ kg} = 160\text{€}$

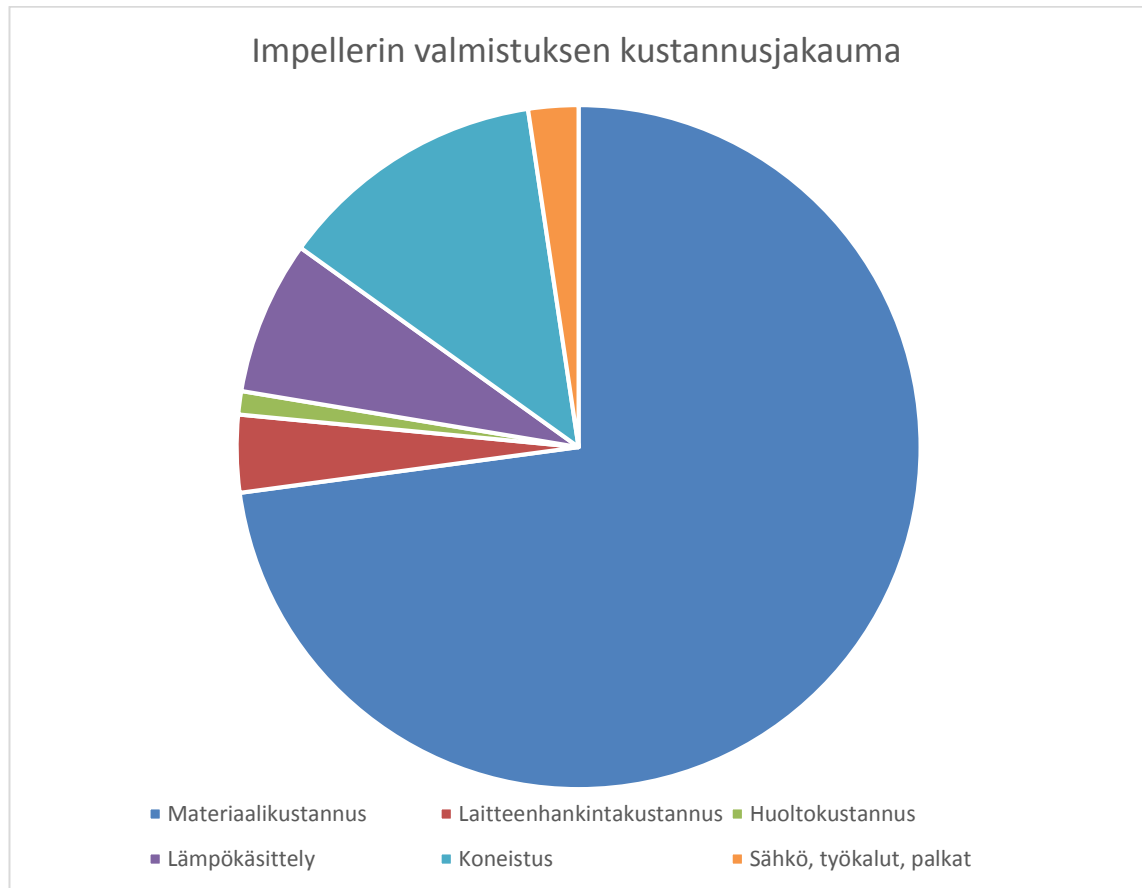
Sähkö + työkalut + palkat, noin 10 % kokonaiskustannuksista = 31,2 €

Siipien tulostuksesta aiheutuvat kustannukset = $44,4 \text{ €} + 7,6 \text{ €} + 160 \text{ €} + 31,2 + 100 \text{ €} = 343,1\text{€}$

Aihion sorvaus (1 h) ja materiaalikustannus = $140 \text{ €} + 18,7 \text{ kg} * 45 \text{ €/kg} + 50 \text{ €} = 1031,5 \text{ €}$

Impellerin kokonaiskustannus hybridimenetelmällä = 1374,6

Kuvassa 30 on eriteltynä hybridimenetelmällä valmistetun impellerin kustannusten jakautuminen.



Kuva 30. Hybridimenetelmällä valmistetun impellerin kustannusjakauma.

Impellerin arvioitu valmistuskustannus hybridimenetelmällä on noin 77 euroa ja 6 % kalliimpi kuin perinteisesti koneistamalla valmistetun impellerin valmistuskustannus.

Saatujen kustannusten perusteella impellerin valmistus hybridimenetelmällä ei ole edullisempaa kuin perinteisellä koneistuksella. Kustannukset ovat lähes yhtä suuria saatujen tulosten perusteella. Jos virhemarginaalina pidetään 10 %, voidaan todeta, että kyseisen impellerin valmistaminen kustantaa yhtä paljon molemmilla menetelmillä.

6.4.2 Kustannusarvio 2

Kustannusarviota tehtäessä lähtöarvojen määrittäminen vaikuttaa paljon saatuun tulokseen, siksi on hyvä arvioida kustannuksia eri lähtöarvoilla. Seuraavassa kustannusarviossa on titaani jauheen hinta laskenut 300 euroon, tulostusnopeus noussut 1 kilogrammaan tunnissa ja laitteen poistoaika nostettu 10 vuoteen. Kustannusarvion lähtöarvot ovat taulukossa 2.

Taulukko 2. *Impellerin suorakerrostuksen kustannusarvion lähtöarvot.*

Impellerin valmistuskustannusarvion lähtöarvot	
Perinteinen koneistusaika (h)	2,9
Koneistuksen tuntihinta (€/h)	140
Tankoaihion massa (Kg)	18,7
Sahaus (€)	50
Tankoaihion hinta (€/Kg)	45
Siipien massa (Kg)	0,24
Aihion massa (Kg)	2
Titaani jauhe hinta (€/Kg)	300
Lämpökäsittely (€)	100
Koneen hankintahinta (€)	800000
Tulostusnopeus (Kg/h)	1
Tarvittava jauhe (Kg)	0,4
Huoltokustannus/vuosi (€)	30000
Laitteen käyttöaika/vuosi (h)	4160
Laitteen poistoaika(vuotta)	10
Laskentakorkokanta	0,05
Investoinnin JA (€)	50000
Siipien tulostusaika (h)	0,4
Viimeistelykoneistus (h)	0,25

Kustannusarvoin mukaan impellerin valmistuskustannus lähtöarvoihin tehtyjen muutosten jälkeen on 982 euroa. Näillä lähtöarvoilla impellerin valmistuskustannus suorakerrostuksella on 392,6 euroa halvempi kuin aikaisemmassa kustannusarviossa.

Näillä lähtöarvoilla impellerin valmistaminen hybridimenetelmällä olisi 315,5 euroa ja 24% halvempaa kuin perinteisesti koneistamalla.

Nämä lähtöarvot ovat kuitenkin melko optimiset ja tällä hetkellä niiden saavuttaminen on epätodennäköistä. Mutta tulevaisuudessa jauhemateriaalien hintojen laskiessa ja teknologian kehittyessä nämä lähtöarvot voidaan saavuttaa.

6.4.3 Haasteet impellerien suorakerrostuksessa

Haastatteluiden perusteella impellerien valmistuksesta suorakerrostuksella nousi useita kysymyksiä, jotka kannattaa selvittää enne kuin tekee päätöksen suorakerrostuslaitteen hankinnasta.

Impellerien valmistaminen kannattaa tehdä hybridimenetelmällä, eli 5-akselisella työstökoneella, johon on integroitu suorakerrostuspää. Haastatteluissa nousseiden huomioiden

perusteella kannattaa selvittää, kuinka paljon impellerin lavat vääntyvät suorakerrostuksen lämpövaikutuksen takia ja kuinka paljon suorakerrostus aiheuttaa jäännösjännityksiä lapoihin ja kestävätkö lavat koneistuksen jäännösjännityksistä huolimatta. Lisäksi kannattaa selvittää lämpökäsittelyllä tehtävän jännityksenpoiston vaikutukset lapojen muotoon, jos lavat vaativat koneistusta vielä jännityksenpoiston jälkeen, nousevat valmistuskustannukset luultavasti liian suuriksi.

Lisäksi haasteina voidaan pitää saavutettavissa olevaa laatua ja prosessin toistettavuutta, koska teknologia on vielä kehitysvaiheessa. Jos valmistetaan impellereitä suorakerrostuksella samanlaisiksi kuin perinteisellä valmistuksella, niin ainoa hyöty mikä voidaan saavuttaa, on kustannussäästö mutta kustannusarvioni mukaan suurta säästöä ei ole saavutettavissa.

Jos halutaan valmistaa impellereitä suorakerrostuksella, niin kannattaa selvittää mahdollisuudet yhteistyöhön asiakkaan kanssa. Yhdessä asiakkaan kanssa voisi kehittää impellereihin uusia ominaisuuksia ja suunnitella impelleri uudelleen, siten että suorakerrostuksella voitaisiin saavuttaa suurempia hyötyjä.

6.5 Hammaspyörän suorakerrostus

Haastatteluiden perusteella hammaspyörien valmistaminen suorakerrostuksella olisi liian kallista ja hidasta. Lisäksi suorakerrostuksella valmistettujen hammaspyörien lujuuksien ei uskottu olevan riittäviä ja standardien puuttuminen on iso haaste ja luokituslaitosten hyväksynnän saaminen tälle menetelmälle koettiin erittäin epätodennäköiseksi erityisesti hammaspyörän hampaiden valmistuksen osalta.

Hammaspyörän suorakerrostuksen kustannuksia on silti hyvä tutkia, jotta voidaan myös laskemalla arvioida kuinka paljon kalliimpaa olisi valmistaa hammaspyöriä tulostamalla verrattuna perinteiseen koneistukseen. Esimerkkihammaspyöräksi valittiin pieni lautaspyörä, jonka massa on 1,4 kg.

6.5.1 Kustannusarvio

Hammaspyörän valmistuskustannusarviossa on huomioitu valmistuskustannukset ennen lämpökäsittelyä, koska lämpökäsittelyn jälkeiset kustannukset ovat samat, riippumatta siitä, onko hammaspyörä valmistettu suorakerrostuksella tai perinteisellä koneistuksella.

Taulukossa 3 on eriteltynä perinteisen koneistuksen kustannukset hammaspyörälle ennen lämpökäsittelyä.

Taulukko 3. Perinteisen koneistuksen kustannukset hammaspyörälle ennen lämpökäsittelyä.

Koneistuksen kustannukset hammaspyörälle	
Materiaalikustannus	5,77 €
Palkkakustannus	42,64 €
Muiden koneiden mukut	22,04 €
Pehmeä hammastuksen mukut	20,50 €
Poistot ja korot	54,37 €
Yhteensä	145,32 €

Koneistuskustannukset ovat yrityksen katelaskelmasta. Arvio kyseisen hammaspyörän koneistuskustannuksista ennen lämpökäsittelyä on 145,3€

Hybridimenetelmän valmistuskustannuksissa on käytetty samoja investointilaskelmia kuin impellerin valmistuskustannuslaskuissa. Hybridilaitteena laskuissa on ollut DMG Mori Seiki, Lasertec 65. Taulukossa 4 on eriteltyä kustannusarvion lähtöarvot.

Taulukko 4. Hammaspyörän hybrdivalmistuksen kustannusarvion lähtöarvot.

Hammaspyörän valmistuskustannusarvion lähtöarvot	
Koneen hankintahinta (€)	800000
Tulostusnopeus (Kg/h)	0,5
Hammaspyörän massa (Kg)	1,4
Tarvittava jauhe (Kg)	1,68
Tulostusaika (h)	3,36
Viimeistelykoneistusaika (h)	0,25
Investointikustannus (€/h)	42,24
Jauheen hinta (€/Kg)	30
Huoltokustannus (€/h)	7,2

Lähtöarvojen perusteella on laskettu hammaspyörän hybrdivalmistuksesta aiheutuvat kustannukset. Taulukossa 5 on eriteltyä hammaspyörän hybrdivalmistuskustannukset.

Taulukko 5. *Hammaspyörän hybridivalmistuskustannukset ennen lämpökäsittelyä.*

Hammaspyörän valmistuskustannus ennen lämpökäsittelyä	
Materiaalikustannus	50,40 €
Investointikustannus	141,94 €
Huoltokustannus	24,23 €
Viimeistelykoneistus	12,36 €
Sähkö + työkalut + palkat, noin 10 % kokonaiskustannuksista	22,89 €
Yhteensä	251,82 €

Kustannusarvion perusteella hammaspyörän valmistaminen hybridimenetelmällä maksaisi 251,8 €. Hybridivalmistuksen kustannukset ovat 106,5€ kalliimmat kuin perinteisen koneistuksen. Laskuissa käytetyn hammaspyörän hybridivalmistus on kustannusarvion mukaan noin 73% kalliimpaa kuin perinteinen koneistus.

6.6 Perusteltu ehdotus materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämisestä

Suorakerrostuksen kannattava hyödyntäminen yrityksen nykyisten tuotteiden valmistuksessa on melko haastavaa. Suorakerrostuksen kannattava hyödyntäminen sellaisten tuotteiden valmistamisessa, jotka ovat täysin samanlaisia kuin perinteisesti valmistetut kappaleet, on todella haasteellista. Materiaalia lisäävässä valmistuksessa suurimmat hyödyt luodaan suunnittelussa, materiaalia lisäävällä valmistuksella valmistetut kappaleet tulisi olla jollain tavalla parempia kuin perinteisellä valmistuksella valmistetut kappaleet. Kappaleet tulisikin suunnitella uudestaan ja lisätä niihin sellaisia ominaisuuksia, joita perinteisellä valmistuksella ei ole aiemmin voitu tehdä, tai valmistaminen on ollut liian kallista. Siksi tuotteiden tulisi olla sellaisia, joita perinteisen valmistuksen aiheuttamat rajoitteet eivät rajoita.

Impellerien valmistaminen voisi olla mahdollisesti potentiaalinen tuote valmistettavaksi suorakerrostuksella. Aiemmin laskemani kustannusarvion mukaan paineilmaa ohjaavien impellerien valmistaminen suorakerrostuksella voisi olla kustannuksiltaan lähes samaa tasoa kuin perinteisesti valmistamalla. Haasteina ovat kuitenkin valmistusprosessin laaduntuottokyky, lämmöstä aiheutuvat muodonmuutokset ja sisäiset jännitykset.

Erilaisissa valmistuspoikkeamien korjauksissa ja kappaleiden pinnoituksissa suorakerrostuksella on yrityksen nykyisissä tuotteissa suurin potentiaali. Suorakerrostuslaitteen hankkiminen pelkästään korjauksia ja pinnoituksia varten ei kuitenkaan ole järkevää ja siitä ei ole saatavissa suurta hyötyä. Pinnoituksia ja korjauksia tehtäessä kannattaa käyttää alihankintaa ennemmin kuin hankkia oma suorakerrostuslaite.

Jos halutaan saada suurimmat hyödyt suorakerroksessa, tulisi olla jokin oma tuote, joka suunniteltaisiin ja valmistettaisiin itse. Yritys on tällä hetkellä komponenttitoimittaja ja se rajoittaa suorakerroksen hyödyntämismahdollisuuksia. Oman tuotteen valmistaminen vaatisi siten muutosta yrityksen nykyiseen strategiaan.

6.7 Tulosten arviointi

Oman arvioni mukaan kirjallisuustutkimuksessa käytetyt lähteet ovat luotettavia ja kirjallisuustutkimuksen tulokset onnistuneita. Haastattelututkimus onnistui mielestäni hyvin ja saadut vastaukset olivat erittäin hyödyllisiä tutkimuksen kannalta. Vastausten perusteella tehdyt johtopäätökset ovat mielestäni loogisia ja luotettavia. Impellerin ja hammaspyörän kustannuslaskelmissa on tehty erilaisia arvioita esimerkiksi laitteen vuosittaisesta käyttöajasta, investoinnin pitoajasta ja huoltokustannuksista, jotka vaikuttavat saatuihin tuloksiin. Kustannuslaskujen virhemarginaali on arvioni mukaan noin 10 %

7 YHTEENVETO

7.1 Päätulokset ja niiden merkitys

Metallien materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmistä suorakerrostus on potentiaalisin menetelmä yrityksen tuotteille ja tuotannolle. Teknologia on kuitenkin vielä kehitysvaiheessa ja sen maturiteettitaso on asteikolla 1-10 noin 3. Suorakerrostuksen hyödyntämismahdollisuudet rajoittuvat tällä hetkellä kappaleiden korjauksiin ja pinnoituksiin. Perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistetun kappaleen valmistaminen suorakerrostuksella ei ole kannattavaa tällä hetkellä, koska suorakerrostus on kallis ja hidas menetelmä verrattuna perinteiseen valmistukseen. Materiaalia lisäävässä valmistuksessa suurimmat hyödyt luodaan suunnittelussa, joten suurimmat hyödyt voidaan saavuttaa oman tuotteen suunnittelussa tai asiakkaan tuotteen kehittämisessä yhteistyössä asiakkaan kanssa. Tulevaisuudessa teknologia tulee kehittymään ja sekä laitteiden että materiaalien hinnat tulevat laskemaan. Suorakerrostuksen hyödyntäminen perinteisen konepajan tuotannossa tulee kannattavammaksi, mutta menetelmä ei tule korvaamaan kokonaan perinteisiä valmistusmenetelmiä.

7.2 Ehdotukset jatkotoimenpiteistä

Suunniteltaessa suorakerrostuksen hyödyntämistä yrityksen kaarevahampaisten kartiohammaspyörien valmistuksessa täytyisi ensin selvittää suorakerrostuksella saavutettavat materiaaliominaisuudet. Pitäisi saada oikeasta materiaalista valmistettu testikappale, jolle tehdään lujuuskokeet. Jos lujuuskokeissa saadaan riittävät tulokset, kannattaa tutkia tarkemmin suorakerrostuksen kustannuksia ja saavutettavia hyötyjä hammaspyörien osalta.

Impellerien valmistuksessa kannattaa selvittää suorakerrostuksella saavutettava laatu ja valmistusprosessin haasteet. Haasteita ovat siipien mahdollinen vääntyminen suorakerrostuksen aikana, sisäiset jännitykset ja jännityksenpoistossa mahdollisesti tapahtuvat muodonmuutokset.

Suorakerrostuksella saatavat suurimmat hyödyt on saavutettavissa siten, että tuote suunnitellaan uudelleen suorakerrostuksella valmistettavaksi. Tuotteen uudelleen suunnittelussa kannattaa selvittää mahdollisuudet yhteistyöhön asiakkaan kanssa. Toinen vaihtoehto on aloittaa oman tuotteen valmistaminen suorakerrostuksella ja strategian muuttaminen, mutta se vaatisi jo enemmän tutkimusta ja investointeja.

Suorakerrostuksen kannattava hyödyntäminen yrityksen tuotannossa on tällä hetkellä kustannusten puolesta todella haasteellista. Tulevaisuudessa teknologian kehittyessä ja materiaalien ja laitteiden hintojen laskiessa suorakerrostus voi kehittyä myös kustannus-

ten puolesta potentiaaliseksi valmistusmenetelmäksi. Tällä hetkellä en vielä ehdota investoimaan suorakerrostuslaitteeseen, vaan kannattaa seurata teknologian ja kustannusten kehitystä ja tutkia lisää erilaisia suorakerrostuksen hyödyntämiskohteita.

7.3 Työn onnistuminen

Työssä saavutettiin sille asetetut tavoitteet ja työssä käytettiin onnistuneesti tutkimusmenetelminä kirjallisuus- ja haastattelututkimusta. Kirjallisuustutkimuksessa selvitettiin eri menetelmiä materiaalia lisäävässä valmistuksessa ja niiden avulla saavutettavia hyötyjä ja menetelmien käyttöä rajoittavia haasteita. Kirjallisuustutkimuksessa selvitettiin myös suorakerrostuksen maturiteettitaso ja mihin suuntaan teknologia on kehittymässä. Soveltavassa osuudessa selvitettiin suorakerrostuksella saavutettavia hyötyjä yrityksen tuotteissa ja tuotannossa. Haastattelumenetelmänä oli puolistrukturoitu teemahaastattelu ja haastateltavina oli tuotannon, teknisen asiakaspalvelun ja myynnin asiantuntijoita. Haastattelututkimus onnistui hyvin ja haastatteluiden perusteella onnistuttiin tekemään johtopäätöksiä suorakerrostuksen hyödyntämismahdollisuuksista yrityksen tuotteille ja tuotannolle.

LÄHTEET

Additive Manufacturing Technology Standards, ASTM INTERNATIONAL, verkkosivu Saatavissa: <https://www.astm.org/Standards/additive-manufacturing-technology-standards.html>

Berger, R. (2016). Additive Manufacturing – next generation (AMnx) Study by Roland Berger (HiRes), Roland Berger (HiRes),

CHEKUROV, S., EKLUND, P., KUJANPÄÄ, V., PEKKARINEN, J., SYRJÄLÄ, K. & VIHINEN, J. (2017). 3D-tulostuksen suunnittelu- ja päätöksentekopas yrityksille, DIMECC Oy, Tampere,

Conner, B.P., Manogharan, G.P., Martof, A.N., Rodomsky, L.M., Rodomsky, C.M., Jordan, D.C. & Limperos, J.W. (2014). Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services, Additive Manufacturing, Vol. 1-4 pp. 64-76.

Frazier, W. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 23(6), pp. 1917-1928.

Frost&Sullivan (2015). Additive Manufacturing–Technologies for Emerging Applications (TechVision), 73 p.

Frost & Sullivan's Global 360° Research Team (2016). Global Additive Manufacturing Market, Forecast to 2025, Frost&Sullivan, 61 p.

Gartner, (2015), Gartner's 2015 Hype Cycle for Emerging Technologies, Viitattu: 28.2.2017, Saatavissa: <http://www.gartner.com/newsroom/id/3114217>

Gibson, I., Rosen, D.W. & Stucker, B. (2010). Additive Manufacturing Technologies, Springer US, Boston, MA,

Gu, D. (2015). Laser additive manufacturing of high-performance materials, Springer, Berlin [u.a.],

Hyvönen, J. (2008). JANNE HYVÖNEN MATERIAALINPOISTON OPTIMOINTI VIIMEISTELYTYÖSTÖSSÄ 3D-KOORDINAATTIMITTAUSKONETTA HYÖDYNTÄEN, Tampereen teknillinen yliopisto, 85 p.

Materialise NV (2015) Design Guides Homepage. <https://i.materialise.com/materials/design-guides>

Mazakusa Introduces New Hybrid Multi Tasking Technology, Mazakusa, verkkosivu Saatavissa: <https://www.mazakusa.com/news-events/press-releases/mazak-introduces-new-hybrid-multi-tasking-technology/>

Mikko Hovilehto (2016). CHARACTERIZATION OF DESIGN OF A PRODUCT FOR ADDITIVE MANUFACTURING Lappeenranta teknillinen yliopisto, 91 p.

Olsson Bengt (2003). Engineering Report Tool Investment Analyzer, Sandvik, Available: https://www.steptools.com/stds/stepnc/2008_ccat/Tool_Assembly_Instructions_HSK633.pdf.

Peters, S. (2015). A readiness level model for new manufacturing technologies, *Production Engineering*, Vol. 9(5), pp. 647-654.

SFS-ISO (2016). SFS-ISO/ASTM 52900:2016 ”Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia”, SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, Helsinki

Thompson, S.M., Bian, L., Shamsaei, N. & Yadollahi, A. (2015). An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics, *Additive Manufacturing*, Vol. 8 pp. 36-62.

Thompson, M.K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R.I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B. & Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 65(2), pp. 737-760.

Tuomi J. & Sarajärvi A. (2002). Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi, Tammi, Helsinki

Tuominen, J. (2016). Directed energy deposition – Advances in surfacing, remanufacturing & additive manufacturing

Wohlers Report (2014), 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates, Inc. 275 p.

Xinhong, X., Haiou, Z., Guilan, W. & Guoxian, W. (2010). Hybrid plasma deposition and milling for an aeroengine double helix integral impeller made of superalloy, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 26(4), pp. 291-295. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584509000982>.

LIITE A: TUOTANNON HAASTATTELUKYSYMYKSET

Haastattelukysymykset/ hammaspyörien tuotanto

1. Suorakerrostuksella voidaan tehdä korjauksia, jolloin vioittunut alue koneistetaan puhtaaksi ja sen jälkeen korjataan materiaalia lisäämällä ja viimeistellään koneistamalla. Suorakerrostus mahdollistaa sellaisten kappaleiden korjaamisen, joita ei ole ollut mahdollista korjata aiemmin perinteisillä menetelmillä, esim. turbiinin siivet. Hammaspyörien korjauksia on tehty alihankinnassa laser cladding-menetelmällä. Voisiko korjausta hyödyntää tuotannossa suteen menneiden hammaspyörien korjauksessa? Paljonko tuotannossa syntyy susi kappaleita?
2. Suorakerrostuksella voidaan helpottaa kappaleiden valmistusta. Sorvattuun kappaleeseen voidaan esimerkiksi tulostaa olakkeet, joiden avulla alkuperäisen aihion kokoa ja materiaalia poistavaa valmistusta saadaan vähennettyä ja koneistusaikaa pienennettyä. Onko hammaspyörien valmistuksessa vastaavia saavutettavissa olevia hyötyjä?
3. Hybridi menetelmät (<https://www.youtube.com/watch?v=1P6IUCtfz8I>), joissa yhdistetään materiaalia lisäävää ja poistavaa valmistusta voivat tuottaa suoraan valmiita kappaleita. Minkälaisia hyötyjä hammaspyörien valmistuksessa voisi saavuttaa materiaalia lisäävän ja poistavan valmistuksen yhdistämisellä samalla työstökoneella?
4. Suorakerrostusta on enenevissä määrin käytetty rakenteiden valmistamiseen, joiden perinteinen valmistaminen vaatii paljon materiaalia poistavaa työstöä taotusta aihioista. Voisiko suorakerrostusta hyödyntää sellaisten hammaspyörien valmistuksessa, joiden valmistuksessa aihioista poistetaan paljon materiaalia?
5. Suorakerrostus mahdollistaa tilausten perusteella tapahtuvan joustavan JIT -tuotannon, jolloin tuotannon erilaisia hukkia saadaan vähennettyä ja läpimenoaikaa mahdollisesti lyhennettyä. Kuinka suuria hyötyjä voitaisiin saavuttaa nykytilaan verrattuna? Mikä on hammaspyörien läpimenoaika ja kuinka paljon kesken-eräistä tuotantoa ja varastoja on tällä hetkellä?
6. Mikä on henkilökohtainen mielipiteesi materiaalia lisäävästä valmistuksesta ja sen hyödyntämisestä ATA Gearsin tuotannossa?

LIITE B: TEKNISEN ASIAKASPALVELUN HAASTATTELUKYSYMYKSET

Haastattelukysymykset/ hammaspyörien tekninen asiakaspalvelu

1. Suorakerrostuksella voidaan valmistaa tuotteita samoilla toiminnallisilla ominaisuuksilla, mutta pienemmällä materiaalin määrällä, tulostamalla materiaalia vain sinne missä sitä tarvitaan. Voidaanko hammaspyöriä keventää ja mitä hyötyjä hammaspyörien keventämisellä voidaan saavuttaa?
2. Suorakerrostuksella voidaan valmistaa kappaleita, joiden geometria on paljon monimutkaisempi kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä. Monimutkainen geometria ei lisää kappaleen valmistusaikaa tai – kustannuksia. Myös sisäiset kanavat ovat mahdollisia suorakerrostuksella. Voiko sisäisillä kanavilla saada jotain lisäarvoa hammaspyöriin?
3. Suorakerrostus mahdollistaa ominaisuuksien lisäämisen olemassa olevaan kappaleeseen. Voidaan lisätä haluttua materiaalia juuri oikeaan kohtaan kappaletta. Millä tavalla tätä voisi hyödyntää hammaspyörien valmistuksessa? Voidaanko asiakkaalle luoda lisäarvoa uusilla ominaisuuksilla, joita ei ole ennen ollut mahdollista tai kannattavaa valmistaa perinteisillä menetelmillä?
4. Suorakerrostuksella on mahdollista vaihtaa materiaalia kesken tulostuksen. Eri-laisilla metallijauhesekoituksilla on myös mahdollista valmistaa täysin uusia materiaaliseoksia.
Tulostusparametreja ja materiaaleja muuttamalla voidaan valmistaa rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan paljon toimivampia tuotteita, kuin perinteisessä valmistuksessa. Toisiko usean materiaalin yhdistäminen lisäarvoa hammaspyörien toiminnollisuuteen?
5. Suorakerrostuksella on mahdollista päällystää ohuita kerroksia korroosiota ja kulumista kestävästä materiaalista toiminnallisuuden ja elinkaaren parantamiseksi. Pinnoitukset ovat metallurgisessa sidoksessa, joka on kestävämpi kuin esim. kromauksen mekaaninen sidos. Menetelmällä voidaan tehdä tehokkaasti pinnoituksia geometrialtaan monimutkaisiin kappaleisiin. Voisiko erilaisia pinnoituksia hyödyntää hammaspyörien valmistuksessa?
6. Pinnoitteiden lisäksi voidaan tehdä myös korjauksia, jolloin kulunut tai vioittunut alue koneistetaan puhtaaksi ja sen jälkeen korjataan materiaalia lisäämällä ja

viimeistellään koneistamalla. Suorakerrostus mahdollistaa sellaisten kappaleiden korjaamisen, joita ei ole ollut mahdollista korjata aiemmin perinteisillä menetelmillä, esim. turbiinin siivet. Hammaspyörien korjauksia on tehty alihankinnassa laser cladding-menetelmällä. Kannattaisiko korjauksia tehdä itse tulevaisuudessa?

7. Perinteisessä valmistuksessa suunnittelijat ovat tottuneet suunnittelemaan mahdollisimman yksinkertaisia ja perinteisillä valmistusmenetelmillä helposti valmistettavia tuotteita. Materiaalia lisäävä valmistus tekee tähän ajattelutapaan radikaalin muutoksen, sillä suunniteltavien kappaleiden kompleksisuus lisääntyy ja valmistusprosessi ei rajoita suunnittelua kuten perinteisessä valmistuksessa. Mitä hyötyjä suunnittelun vapautuminen mahdollistaa ja kuinka suurena haasteena pidät suunnittelussa vaadittavaa ajattelutavan muutosta?
8. Suorakerrostuksella voidaan helpottaa kappaleiden valmistusta. Sorvattuun kappaleeseen voidaan esimerkiksi tulostaa olakkeet, joiden avulla alkuperäisen aihiön kokoa ja materiaalia poistavaa valmistusta saadaan vähennettyä ja koneistusaikaa pienennettyä. Onko hammaspyörien valmistuksessa vastaavia saavutettavissa olevia hyötyjä?
9. Hybridi menetelmät (<https://www.youtube.com/watch?v=1P6IUCtfz8I>), joissa yhdistetään materiaalia lisäävää ja poistavaa valmistusta voivat tuottaa suoraan valmiita kappaleita. Minkälaisia hyötyjä hammaspyörien valmistuksessa voisi saavuttaa materiaalia lisäävän ja poistavan valmistuksen yhdistämisellä samalla työstökoneella? Kappale vaatii luultavasti kuitenkin jäännösjännitysten poiston lämpökäsittelyllä, vaatiiko kappale koneistusta jännityksenpoiston jälkeen?
10. Suorakerrostusta on enenevissä määrin käytetty rakenteiden valmistamiseen, joiden perinteinen valmistaminen vaatii paljon materiaalia poistavaa työstöä taotusta aihioista. Voisiko suorakerrostusta hyödyntää sellaisten hammaspyörien valmistuksessa, joiden valmistuksessa aihioista poistetaan paljon materiaalia?
11. Mikä on henkilökohtainen mielipiteesi materiaalia lisäävästä valmistuksesta ja sen hyödyntämisestä ATA Gearsin tuotannossa?